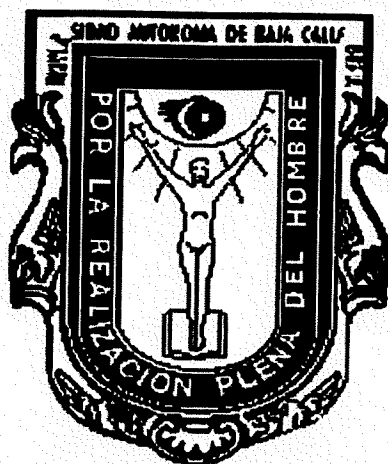


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**FABRICACION DE GUIAS DE ONDA
OPTICAS EN VIDRIO MEDIANTE DIFUSION**

Tesis Profesional
que para obtener el título de

FISICO

presenta

Gladys Guadalupe Páez Nava

Ensenada Baja California México

Diciembre 1996

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

**FABRICACION DE GUIAS DE ONDA OPTICAS
EN VIDRIO MEDIANTE DIFUSION**

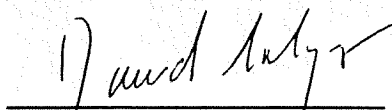
Tesis Profesional que como requisito
parcial para obtener el título de

FISICO

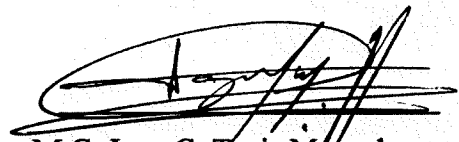
presenta

GLADYS GUADALUPE PAEZ NAVA

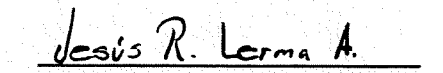
Aprobado por



M.C. David Salazar Miranda
Presidente



M.C. Juan C. Tapia Mercado
1er vocal



M.C. Jesús Ramón Lerma Aragón
Secretario

DEDICATORIA

A mis padres:
Rigoberto y Sofia.

Por su amor infinito, por darme la educación que hoy tengo y por tantas otras cosas...

A mis hermanos:
Nereyda, Francisco, Ricardo, Rigoberto y Rolando.

Por haberme apoyado siempre, por aceptarme tal como soy y por darme su amor desinteresadamente.

A mi sobrina:
Montserrat.

Por su amor y ternura que siempre me transmite.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por permitirme estar con vida.

A mis tíos, Angélica, Cesar y en especial a mi tío Jorge, por sus valiosos consejos, los cuales contribuyeron a mi formación.

A mi prima Diana, a quien considero como una hermana más.

A mi director de tesis M.C David Salazar Miranda por su constante asesoría durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Heriberto Márquez Becerra, por haberme dado la oportunidad de integrarme a su grupo de trabajo, y por su apoyo que todo el tiempo me brindó.

Al M.C. Juan C. Tapia mercado y al M.C. Jesús Ramón Lerma Aragón quienes amablemente aceptaron ser sinodales.

A Todos mis maestros, por la formación académica que me han brindado.

A Roberto Vázquez por su sincera amistad.

A mis compañeros Alex, Poncho, Martha Rivera y Julio, por los momentos de compañerismo que compartimos.

Al personal del departamento de Optica del CICESE, del instituto de fisica de la UNAM-Ensenada y de la Facultad de Ciencias de la UABC por su colaboración y amistad.

RESUMEN.

Se fabricaron guías de onda ópticas en substratos de vidrio. La técnica utilizada fué la de difusión de iones de cobre, la cual consiste en someter a un tratamiento térmico un substrato de vidrio, al que anteriormente se le depositó una película delgada de cobre.

Este proceso es asistido por un campo eléctrico externo, para acelerar el fenómeno de difusión. El trabajo se inicia con una introducción al tema, recalcando la importancia del mismo dentro del marco tecnológico actual. Después se hace una revisión de los conceptos básicos de guías de onda y una descripción del comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de las guías. Posteriormente se describe la fabricación de la guía, desde el tipo de vidrio a utilizar, la elaboración de las películas delgadas, el proceso en sí de difusión, así como la caracterización óptica de las guías de onda obtenidas.

La caracterización óptica de la guía se hizo mediante un sistema automatizado Metricon Model 2010 prism coupler, el cual utiliza el método de acoplamiento por prisma de alto índice. Así se determina el número de modos que aceptan las guías de onda, el valor de los índices efectivos, así como la profundidad a la que se encuentran éstos modos. El método WKB inverso (aproximación de Wentzel-Kramers-Brillouin) se utiliza para calcular, a partir de las constantes de propagación en guías de onda obtenidas mediante el uso de la técnica de acoplamiento por prisma, los perfiles del índice de refracción que presentan la guías.

<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
Capítulo I.- INTRODUCCION.....	1
Capítulo II.- CONCEPTOS BASICOS.....	4
II.1.- GUIAS DE ONDA.....	4
II.2.- ACOPLAMIENTO DE LUZ A LA GUIA.....	10
II.3.- PROCESO DE DIFUSION.....	11
II.4.- EL VIDRIO.....	12
Capítulo III.- FABRICACIÓN DE LA GUIA.....	15
III.1.- VIDRIO PREMIUM.....	15
III.2.- EL COBRE.....	16
III.3.- PROCESO DE DIFUSION.....	17
III.4.- CARACTERIZACION MODAL.....	24
III.5.- PERFILES DE INDICE DE REFRACCION.....	29
III.6.- ANALISIS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.....	32
Capítulo IV.- CONCLUSIONES.....	33
Capítulo V.- LITERATURA CITADA.....	35

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1 Propagación dentro de la guía de onda.....	5
2 Muestra el equipo donde se hicieron los depositos de las películas (evaporadora Edwards 306).....	18
3 Tipo de configuración utilizada para la difusión.....	19
4 Esquema del sistema donde se realizaron las difusiones..	20
5 Electrodo utilizados entre los cuales se encuentra la muestra.....	21
6 Montaje experimental donde se realizó el proceso de difusión.....	22
7 Curvas obtenidas experimentalmente: tiempo vs. corriente.....	23
8 Técnica de acoplamiento de luz a guías de onda mediante un prisma de alto índice.....	24
9 Modo de propagación que presentó la guía G4.....	27
10 Modos de propagación que presentó la guía G13.....	28
11 Modos de propagación que presentó la guía G15.....	28
12 Modos de propagación que presentó la guía G18.....	29

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
13	Perfil del índice de refracción para la guía G13.....	30
14	Perfil del índice de refracción para la guía G14.....	31
15	Perfil del índice de refracción para la guía G18.....	31
16	Se observa la concentración del cobre para la guía G4.....	32

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I	Condiciones experimentales que se aplicaron a cada muestra.....	22
II	Se muestra el número de modos, el índice efectivo y la profundidad que presentaron las guías.....	26

I.- INTRODUCCION.

Desde hace un poco más de dos décadas se ha venido desarrollando la óptica integrada. Esta nueva tecnología ha logrado introducir a la electrónica convencional el uso de la luz como portador de información digital. Para ello ha desarrollado guías de onda que aseguran la propagación de la luz en una serie de circuitos ópticos. La difusión de iones metálicos en substratos de vidrios es una de las técnicas que se ha usado en los últimos años para la elaboración de elementos pasivos de óptica integrada (Findakly 1985), (Ludwing 1986), (Gorty et. al, 1986). Los vidrios están formados principalmente por SiO_2 y una serie de óxidos que se pueden clasificar en formadores de red, intermedios de red y modificadores de red. Los iones modificadores se encuentran en porcentajes menores en la red, no están unidos fuertemente a los silicatos y además poseen una gran movilidad que depende de la temperatura (la movilidad de éstos iones tienen un comportamiento tipo Arrhenius $\mu' = \mu_o \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$ donde μ' es la movilidad, E es la energía de activación y R es la constante de los gases). Bajo ciertas condiciones es posible mover estos iones dentro del vidrio.

Existen tres maneras de producir dichos movimientos iónicos en vidrios: agitación térmica, aplicación de una diferencia de potencial y por la combinación de ambas. Las propiedades ópticas del vidrio están determinadas por la composición química del mismo y pueden ser alteradas si ésta cambia. Cuando se introducen los iones metálicos en la red

vítrea, algunos de los elementos modificadores originales de la red son desplazados y como consecuencia, se producen un cambio en el índice de refracción. Este cambio se debe a dos razones: la diferencia en la polarizabilidad por unidad de volumen o a los esfuerzos mecánicos producidos por la diferencia del tamaño de los iones intercambiados.

El proceso de difusión se lleva a cabo sin el riesgo de una deformación viscosa, ya que el proceso se realiza a temperaturas inferiores a la de reblandecimiento. El intercambio se puede realizar teniendo como fuente externa de iones a baños de sales (nitrato de potasio, nitrato de plata, etc.). Otra manera de realizar cambios en el índice de refracción consiste en difundir iones metálicos provenientes directamente de un sólido (películas delgadas). En ambos casos el proceso origina una modificación de la red vítrea. En la última técnica, para aumentar la velocidad de difusión se puede aplicar un campo eléctrico externo.

Existen varios trabajos que demuestran que es el sodio el elemento que se desplaza en los procesos de difusión en vidrios (Gupta et al., 1992), (Najafi et al., 1986), para la cinética del intercambio $\text{Cu}^+ = \text{Na}^+$ ha sido poco estudiada. Datos dispersos al respecto aparecen en la literatura (Ramaswamy et al., 1988) y una comparación entre ellos no es posible debido a las diferentes composiciones químicas de los vidrios usados, existiendo marcadas discrepancias al determinar coeficientes de difusión y energía de activación.

El intercambio iónico tiene como consecuencia, primero una generación de tensiones motivada por la diferencia de tamaños de los iones intercambiados y, segundo

una relajación de estas tensiones como consecuencia del acomodo de la red vítrea. Estas tensiones originan una birrefringencia.

En este trabajo se fabrican guías de onda ópticas, utilizando la difusión de iones de cobre en substratos de vidrio. El cobre al tener un radio iónico semejante al del sodio ($r_{\text{Na}^+} - r_{\text{Cu}^+} = 0.01 \text{ \AA}$), al sustituirlo en la red vítrea, debe de ocasionar tensiones menores que la causada por la presencia de la plata ($r_{\text{Na}^+} - r_{\text{Ag}^+} = 0.15 \text{ \AA}$), elemento frecuentemente usado en óptica integrada. Este trabajo es el principio de una investigación sobre la posible sustitución del cobre por la plata en la fabricación de guías de ondas.

II.- CONCEPTOS BASICOS.

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de las guías de ondas ópticas y las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de la luz dentro de ellas.

Inicialmente se hace un tratamiento sobre guías de onda planas y después el tratamiento se complementa al considerar guías que presentan un gradiente en el índice de refracción.

Un aspecto muy importante en la óptica integrada es el de acoplar la luz en las guías o circuitos ópticos. De manera breve se mencionan algunos de los tipos de acoplamiento que existen.

Se hace también una descripción del fenómeno de difusión, se presenta la ecuación que rige este proceso (ley de Fick), así como una de las soluciones de la misma. Finalmente se describe el vidrio, su composición química, su posible coordinación iónica, información con la cual se trata de comprender lo que suceda en su interior cuando se somete a un proceso de difusión.

II.1.- GUIAS DE ONDA.

Las guías se utilizan para confinar y guiar la luz en diversos dispositivos de óptica integrada. Una guía de onda es un material que se encuentra rodeado por dos medios cuyos índices de refracción son tales que al incidir la luz en las fronteras, se produce el fenómeno de reflexión total. En una guía la luz se propaga mediante múltiples reflexiones.

Existen tres tipos básicos de guías de onda:

a) guías de onda cilíndrica, en la cual la mayor cantidad de luz viaja en el núcleo, como un ejemplo tenemos la fibra óptica.

b) guías de onda planas, las cuales consisten de una película de alto índice de refracción depositada sobre un sustrato de bajo índice de refracción. La diferencia entre los índices de refracción de la película y el sustrato causa una reflexión interna total en las interfaces película-sustrato y película aire, por lo cual la luz se confina en una dirección.

c) guías de onda en forma de canal que puede ser de dos tipos, la de un canal de material que se encuentra sobre un sustrato, o la de un canal que se forma dentro de él.

El trazo de rayos es una manera didáctica de comprender el concepto de guía de onda. Aquí la onda guiada se representa por un rayo que se propaga a lo largo de la guía de onda en forma de zig-zag, como se muestra en la figura 1.

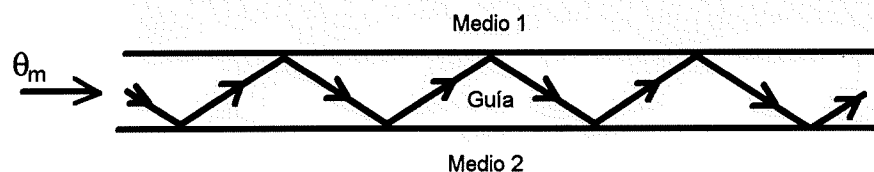


Figura 1.- Propagación dentro de una guía de onda.

Donde θ_m (figura 1) es el ángulo de propagación. El rayo queda confinado dentro de la guía debido a que en cada una de las fronteras de la guía se produce el fenómeno de

reflexión interna total. Para que esto suceda es necesario que el índice del substrato n_1 y del medio exterior n_2 sean más bajos que el índice de la guía n_g . El ángulo de propagación θ_m debe ser mayor que el ángulo crítico en las fronteras para evitar que escape luz hacia el exterior. Las condiciones físicas de la guía de onda sólo admiten un número discreto de ángulos para que la luz se propague dentro de la guía. Estos ángulos, a los cuales se da la propagación, están dados por la relación de dispersión, o condición de resonancia transversal:

$$2 k_0 h \cos \theta_m - \phi_1 - \phi_2 = 2 \pi m, \quad (1)$$

donde $k_0 = w/c$ (k_0 es el número de onda en el vacío), h es el espesor de la guía, ϕ_1 y ϕ_2 son los corrimientos de fase que sufren los rayos al darse la reflexión interna total en las fronteras y m es el orden del modo.

Para una onda polarizada TE (transversal eléctrica), el corrimiento en fase debido a la reflexión es:

$$\phi_i = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{n_g^2 \sin^2 \theta_m - n_i^2}}{n_g \cos \theta_m} \right), \quad (2)$$

donde el subíndice i toma el valor de 1 ó 2, dependiendo de qué frontera se trate.

Para la luz polarizada TM (transversal magnética), el corrimiento en fase es:

$$\phi_i = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\frac{n_g^2}{n_i^2} \cdot \sqrt{n_g^2 \sin^2 \theta_m - n_i^2}}{n_g \cos \theta_m} \right). \quad (3)$$

Para realizar el análisis físico de una guía de onda, se recurre a las ecuaciones de Maxwell, las cuales para el caso de un dieléctrico isotrópico homogéneo son:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},\end{aligned}\tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0,$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0,$$

donde $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{H}$, $\vec{B}$ son los vectores de campo eléctrico, desplazamiento eléctrico, campo magnético y desplazamiento magnético respectivamente, ϵ es la permitividad eléctrica en el medio y μ es la permeabilidad magnética en el medio.

Al aplicar las relaciones anteriores, la ecuación de onda que se obtiene para el campo eléctrico es:

$$\nabla^2 \vec{E} = \left(\frac{n^2}{c^2} \right) \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2},\tag{5}$$

$$\text{donde } \frac{n}{c} = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Si se supone una dependencia periódica en el tiempo del campo que se propaga en la dirección positiva del eje z en la guía de onda plana, el campo eléctrico se puede escribir como:

$$E(x, y, z) = E_o(x, y) \exp[i(\omega t - \beta k_o z)],\tag{6}$$

donde $k_0 = w/c$, y β es el índice efectivo del modo guiado. Como la guía de onda en la dirección y se extiende indefinidamente, y además se supone que no existe variación del campo en esta dirección, entonces $\partial/\partial y = 0$. La ecuación para el campo eléctrico puede reescribirse como:

$$\frac{\partial^2 E_o(x)}{\partial x^2} + k_o^2 (n^2 - \beta^2) E_o(x) = 0, \quad (7)$$

donde E_o es la amplitud compleja del campo eléctrico. La ecuación de onda para una guía de onda se resuelve aplicando las condiciones en la frontera. Estas condiciones que son las componentes transversales de los campos $\vec{E}$ y $\vec{H}$, así como las componentes normales de $\vec{B}$ y $\vec{D}$ deben ser continuas a través de las interfaces.

Aplicando las condiciones anteriores, obtenemos un conjunto discreto de soluciones, donde cada solución define un modo diferente.

Existen dos conjuntos de modos guiados ortogonalmente polarizados en una guía de onda plana. Uno es el de los modos TE (Transversal Eléctrico) y otro el de los modos TM (Transversal Magnético). Tomando como referencia el espesor de la guía h , para los modos TE, las soluciones a la ecuación de onda son:

$$\begin{aligned} E_{oy}(x) &= C \left(\cos(k_g h) + \left(\frac{\gamma_2}{k_g} \right) \text{sen}(k_g h) \right) [\exp(-\gamma_1(x-h))] & x > h, \\ E_{oy}(x) &= C \left(\cos(k_g h) + \left(\frac{\gamma_2}{k_g} \right) \text{sen}(k_g h) \right) & 0 < x < h, \\ E_{oy}(x) &= C \exp(\gamma_2 x) & x < 0, \end{aligned} \quad (8)$$

con:

$$k_g = k_o (n_g^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \gamma_1 = k_o (\beta^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \gamma_2 = k_o (\beta^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}},$$

donde E_{oy} es la amplitud del campo eléctrico en la dirección y . Para los modos TM los resultados son similares (Born 1985).

Las guías de onda óptica fabricadas por intercambio iónico son llamadas guías de onda ópticas de gradiente, porque el índice de refracción cambia gradualmente (Koshiba, 1990). La distribución del índice de refracción, $n(y)$ puede obtenerse de la siguiente manera:

$$n(y) = n_s + \Delta n \cdot g(y), \quad (9)$$

donde n_s es el índice de refracción del sustrato, Δn es el máximo cambio en el índice de refracción y, $g(y)$ describe la función de distribución del índice de refracción en la dirección y . El valor de la función de distribución está entre 0 y 1. Algunas de las funciones de distribución generalmente usadas son las funciones exponenciales, gaussianas, error de compensación y son expresadas, respectivamente, como siguen:

$$g(y) = \exp \left(\frac{y}{d_y} \right) \quad y \leq 0, \quad (10)$$

$$g(y) = \exp \left(-\frac{y^2}{d_y} \right) \quad y \leq 0, \quad (11)$$

$$g(y) = \operatorname{erfc} \left(\frac{-y}{d_y} \right) \quad y \leq 0, \quad (12)$$

aquí d_y es la profundidad de difusión en la dirección y . La función de error de compensación $\operatorname{erfc}(z)$ está definida como:

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\alpha^2) d\alpha . \quad (13)$$

También existen guías de onda cuyo índice de refracción varía en dos direcciones.

La distribución del índice de refracción $n(x,y)$ puede ser representada como:

$$n(x,y) = n_s + \Delta n f(x) g(y) , \quad (14)$$

aquí $g(y)$ es la distribución del índice de refracción en la dirección y , $f(x)$ lo es para la dirección x .

II.2.- ACOPLAMIENTO DE LUZ A LA GUIA.

La función de un acoplador es la de ajustar la velocidad de fase de la onda incidente a la velocidad de fase necesaria para que la onda pueda ser guiada. Cuando se satisface esta condición, la energía de la onda incidente se transfiere a la guía de onda.

Existen diferentes formas de introducir o extraer un rayo de luz de una guía de onda. Los acopladores, que se usan para ese propósito, se clasifican en dos clases: transversales y longitudinales.

Los acopladores transversales son aquellos en que el haz se enfoca directamente sobre la sección transversal de la guía de onda. La eficiencia de este acoplamiento depende de las características del haz incidente, de la estructura de la guía y presenta varios problemas, de los cuales, uno es la alineación necesaria para enfocar correctamente y otro la irregularidad del perfil de la guía. Debido a lo anterior, estos acopladores son poco usados en guías de onda planas.

La otra clase de acopladores son los longitudinales. En estos el haz se introduce a la guía a incidencia oblicua. Dos ejemplos de acopladores distribuidos son los prismas de alto índice y las rejillas de difracción (Tamir, 1985).

II.3.- PROCESO DE DIFUSION.

Si se llena con mucho cuidado un tubo de ensayo con dos líquidos miscibles de diferente densidad (por ejemplo el agua y una solución de sulfato de cobre) veremos que la superficie de separación, muy distinguible en el primer momento, comienza a disiparse.

Poco a poco aparecerá una zona de transición que irá extinguiéndose hasta que todo el líquido quede homogéneo. El proceso transcurre muy lentamente y la diferencia en las concentraciones en los extremos del tubo de ensayo será notable aún veinticuatro horas después de haber comenzado el experimento.

Este proceso se llama difusión y consiste en que el sistema tiende espontáneamente a nivelar la concentración. Los átomos de uno de los líquidos, de la clase A, se desplazan en dirección donde hay átomos del otro líquido, de la clase B.

Se considera que el primer experimento científico para estudiar la difusión de un cuerpo sólido fue realizado en 1896 por el metalúrgico inglés Roberts-Austen, sin embargo, la ecuación básica de la difusión fué escrita antes, en 1855, por Fick.

Esta ecuación de difusión, modificada por la presencia de un campo eléctrico es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \mu' E \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (15)$$

donde C es la concentración del ión a difundir, D es el coeficiente de difusión, E es el campo eléctrico aplicado, μ' es la movilidad del ión y t es el tiempo de difusión.

La solución a la ecuación anterior (15) que con más frecuencia se utiliza en los problemas de difusión es la solución en forma de la función de error. Las condiciones inicial y de frontera son:

$$C(x, 0) = 0, \quad (16)$$

$$C(0, t) = C_0,$$

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \mu'Et}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{\mu'Ex}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \mu'Et}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\}, \quad (17)$$

con la función *erfc* como se definió anteriormente.

II.4.- EL VIDRIO.

Bajo la amplia denominación genérica de vidrios o de cuerpos vítreos queda comprendida una gran variedad de sustancias que, aunque a temperatura ambiente tienen la apariencia de cuerpos sólidos que les proporcionan su rigidez mecánica, no puede considerarse como tales, ya que carecen de la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido. Si por la estabilidad de su forma los vidrios podrían asimilarse a sólidos, desde el punto de vista de su desorden estructural sus semejanzas con los líquidos son mucho más acusadas. Este hecho que constituye una limitación para incluir a los vidrios entre los sólidos, resulta sin embargo insuficiente para autorizar a aceptarlos

como líquido, si bien puede justificar la designación de líquidos de viscosidad infinita que en muchas ocasiones se les ha aplicado.

La dificultad para encuadrar adecuadamente a los cuerpos vítreos dentro de uno de los tres estados de agregación de la materia dió lugar a que se pensara independizar a los vidrios integrándolos en un cuarto estado de agregación, el estado vítreo. Esta sugerencia nunca llegó, sin embargo, a encontrar una aceptación generalizada.

En la opinión de Morey (Morey, 1945), si se parte de un concepto de cuerpo sólido que prescindiera de la cristalinidad y se base exclusivamente en determinadas propiedades físicas, con límites previamente establecidos para cada estado, podría aplicarse a los vidrios el nombre de sólidos amorfos, con tal de que esta denominación se reservara para bajas temperaturas. La mayor objeción contra ella surgiría si se intentara aplicarla también a las temperaturas en que aquéllos se vuelven plásticos. Por otra parte, se ha comprobado que los vidrios presentan mayor grado de ordenación estructural (orden de corto alcance) que los cuerpos amorfos. Esta ordenación se limita a un pequeño entorno alrededor de cada uno de los iones que forman la red vítrea, a diferencia de la periodicidad de largo alcance que guarda la estructura de los sólidos cristalinos. Por eso para establecer esta diferencia, se emplea también para los vidrios, con mayor adecuación que el anterior, el nombre de sólidos no cristalinos.

Un ion es una partícula con carga positiva o negativa, y de acuerdo a su carga a éste se le denomina catión o anión respectivamente. En una red cristalina o en una red vítrea cada catión se rodea de un determinado número de aniones formando un conjunto

al que se denomina poliedro de coordinación. El número de aniones que se disponen alrededor del catión central recibe el nombre de índice de coordinación.

De acuerdo con las consideraciones anteriores el radio de un catión depende, pues, del número de aniones con que se coordine, y su variación en función del índice de coordinación viene dada por la fórmula de Born:

$$\frac{r_p}{r_m} = \left(\frac{p}{m} \right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (18)$$

donde r_p y r_m representan los radios del catión en coordinación del orden p y m respectivamente, y n es una constante, cuyo valor es aproximadamente igual a 9. De aquí se deduce que, cuando un determinado catión pasa de una coordinación 6 a otra de orden 8, su radio aumenta multiplicándose por 1.036, mientras que si su coordinación disminuye pasando de 6 a 4, su radio se reduce en el factor 0.950.

El comportamiento de los materiales está condicionado en buena parte por la ordenación que guardan entre sí sus elementos constituyentes. Por lo tanto, del conocimiento que se posea acerca de su estructura dependerán las posibilidades de aplicación, y en definitiva, la utilidad de un material.

Las características de los vidrios han hecho mucho más difícil el estudio de su estructura. A ello hay que añadir que la diversidad de los tipos de vidrios obtenidos hasta la fecha y, en muchos casos, la complejidad de su composición impide que pueda adoptarse con validez general un modelo estructural único (Fernández, 1985).

III.- FABRICACIÓN DE LA GUÍA.

En este capítulo se describe el proceso de fabricación de guías de ondas ópticas. Se inicia con la descripción del tipo de vidrio utilizado para el proceso de difusión, su composición química y sus principales características ópticas. De igual manera se mencionan algunas de las características del material utilizado como fuente de iones a difundir (Cu^+). El proceso de fabricación de la guía es presentado desde la descripción de los depósitos de las películas delgadas, la geometría de las mismas y las características del tratamiento térmico aplicado, incluyendo la presencia del campo eléctrico externo.

Se presenta también los resultados de la caracterización óptica de las muestras. Esta caracterización óptica se hizo empleando un sistema automatizado Metricon Model 2010 prism coupler, el cual utiliza el método de acoplamiento por prisma de alto índice para acoplar la luz hacia el interior de la guía. Primeramente se obtienen los modos de propagación que aceptan las guías de onda, el valor de los índices efectivos, así como a la profundidad a la que se encontraron éstos. Con los resultados anteriores, mediante el método WKB inverso, se obtienen los perfiles del índice de refracción para las guías de onda.

III.1.- VIDRIO PREMIUM.

El tipo de vidrio utilizado para este trabajo fué el Premium, con una área de trabajo de aproximadamente de 1cm^2 .

Su índice de refracción es de 1.516 ($\lambda=632.8$ nm) y está compuesto principalmente por los siguientes Oxidos: SiO_2 , Na_2O , K_2O , MgO , CaO y Al_2O_3 .

Algunas de las características que tiene este vidrio y que lo hacen un buen candidato para ser usado en el proceso de difusión, son:

- a).- Alto contenido de iones intercambiables. Dentro de los oxidos modificadores deben existir iones con ligaduras debiles. Esta sustitución de iones generará gradientes de índices de refracción. Existen numerosos trabajos que demuestran que el Na^+ y otros iones pueden ser intercambiados en este vidrio (Honkanen et al., 1988), (Agapiou et al., 1992), (Lerma J. 1992).
- b).- Alta movilidad iónica para poder obtener suficiente profundidad de penetración con bajos tiempos y temperaturas.
- c).- Transmitancia alta, del visible al infrarrojo cercano (600 a 1600 nm).
- d).- Bajo índice de refracción para acoplar con fibras ópticas.

III.2.- EL COBRE.

El cobre es un elemento cuya número atómico es 29, pertenece al grupo I de la tabla periódica. Su estado natural es sólido, actúa con valencia +1 y +2. El radio iónico del Cu^+ es $0.96\text{\AA}$ y para el Cu^{++} es $0.70\text{\AA}$. La semejanza del radio iónico del Cu^+ con el radio iónico del Na^+ ($0.95\text{\AA}$), nos hace suponer que su intercambio produce menos esfuerzos que el intercambio Ag^+-Na^+ que se ha usado para generar guías de onda en vidrios ($r_{\text{Ag}} = 1.13\text{\AA}$). Se pueden lograr gradientes en el índice de refracción sin alterar el

vidrio. Otros datos relacionados son: la temperatura de ebullición es 2595°C y presenta bandas de absorción en 590 nm (Cu° Cobre coloidal), en 280 nm (Cu^{+}) y en 390 nm (Cu^{++}). La energía de activación de los iones de cobre esta en un rango de 0.5-0.8 eV (Gupta et al., 1992), por lo cual es posible producir su difusión a bajas temperaturas.

III.3.- PROCESO DE DIFUSION.

Para la fabricación de guías de ondas ópticas es muy importante que el proceso de difusión se lleve a cabo de una manera controlada. A continuación se enlistan de manera consecutiva los pasos a seguir para la elaboración de la guía.

a).- Empezamos seleccionando el sustrato sobre el cual se fabricará la guía, ya que algunos de los sustratos se encuentran un poco dañados (estrías, coloides), ésto se realiza con la ayuda de un microscopio.

b).- Se limpian los sustratos seleccionados anteriormente. La limpieza del sustrato nos asegura una buena adherencia de la película que se deposita sobre él. La limpieza se hizo con la ayuda del limpiador ultrasonico con microdetergente diluído en agua (una parte de microdetergente por 10 de agua), se utilizaron guantes para evitar la contaminación con grasas, se continuó con alcohol anhidrido y acetona para eliminar cualquier residuo de polvo o grasa sobre la superficie y finalmente se secaron los sustratos con toallas Mil-Spec Tissue, las cuales son suaves y evitan que estos se rayen.

Para verificar la limpieza se utilizó la técnica de inspección por reflexión con luz condensada.

c).- Ya limpios los sustratos, se procede hacer el depósito de la película de Cobre. Los depósitos de las películas se realizaron en una evaporadora Edwards 306, como se observa en la figura 2. Los sustratos se colocan en una montura dentro de la evaporadora. El material que va hacer evaporado se coloca en las cestillas de tungsteno y se procede a generar un vacío parcial ($\sim 10^{-3}$ Torr. con la bomba mecánica y $\sim 10^{-5}$ Torr. con la bomba de difusión). Cuando éste se alcanza, se hace circular una corriente de aproximadamente 100 Amperes por la cestilla de tungsteno, para aumentar la temperatura. Cuando se logra la temperatura de fundición, el material se evapora y deposita sobre los sustratos en donde se condensa con una dispersión mínima.

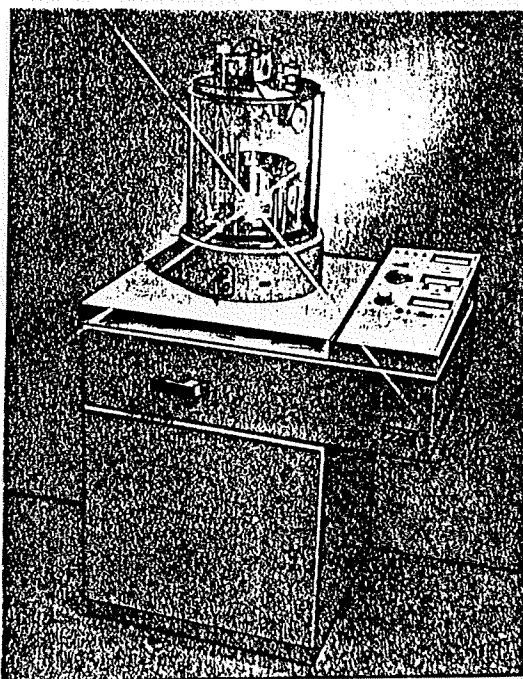


Figura 2.- Muestra el equipo donde se hicieron los depósitos de las películas (evaporadora Edwards 306).

d).- A los substratos se les realizó dos depósitos. Primeramente se les depositó por la parte superior una película de cobre de 550nm de espesor (fuente de iones a difundir) y encima de ésta, y por la parte inferior del substrato, se depositaron películas de oro de 300 nm de espesor. Estos últimos sirven para tener un buen contacto con los electrodos que generarán el campo que se aplicará a la muestras para acelerar el proceso de difusión (en la figura 3 se muestra la configuración utilizada para el proceso de difusión). Al obtener las películas se observa que por la parte de los cantos de las muestras también se deposita película, por lo que es importante verificar y eliminar éstos depósitos para evitar un posible corto circuito cuando se lleve a cabo el proceso de difusión.

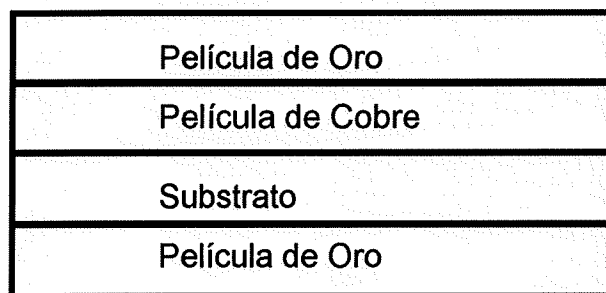


Figura 3.- Se observa el tipo de configuración utilizada para la difusión.

e).- Después de eliminar la película de los cantos de las muestras éstas ya se encuentran listas para someterlas a un proceso de difusión. Se introduce una de ellas en el horno Thermolyne Type 4800 (en la figura 4 se observa un esquema del sistema donde se realizaron las difusiones). Se selecciona la temperatura a la cual se desea trabajar, se

espera aproximadamente 20 minutos para que se establezca la temperatura para llegar al equilibrio térmico antes de aplicar el campo externo.

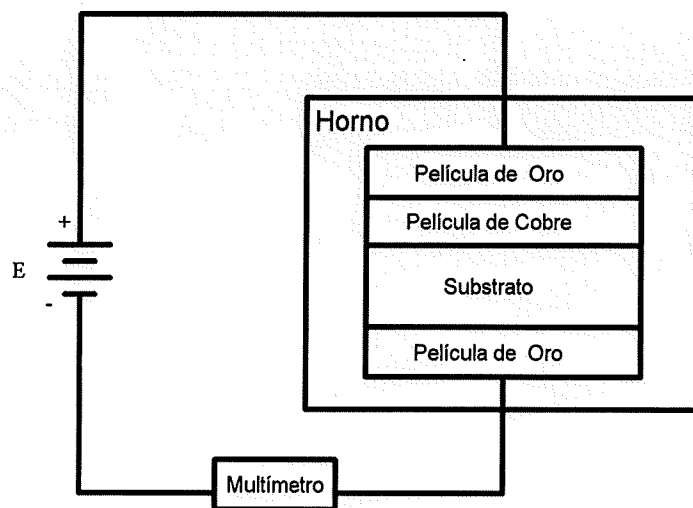


Figura 4.- Esquema del sistema donde se realizaron las difusiones.

f).- Cuando la temperatura en el horno se estabiliza se aplica un campo eléctrico de 30 Volts/mm a la muestra. Para producir éste se usó una fuente de voltaje Hewlett-Packard 6234A, el campo eléctrico se aplicó a través de unos electrodos de acero inoxidable. Para tener un contacto uniforme, mediante un pistón neumático se aplicó a una presión de 40 lb./plg. (ver figura 5) a los electrodos.

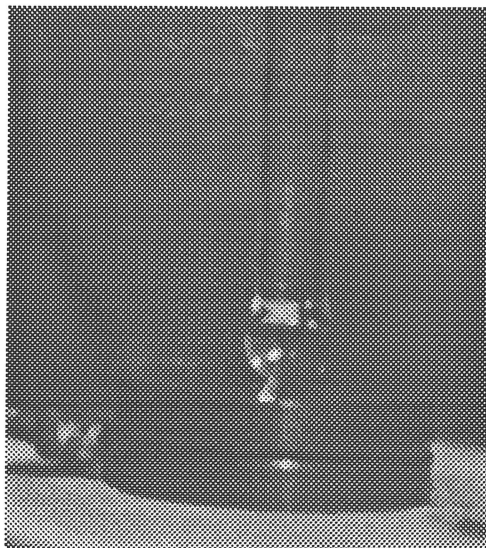


Figura 5.- Se observan los electrodos utilizados entre los cuales se encuentra la muestra.

g).-El flujo de corriente de los iones se mide durante todo el proceso de difusión utilizando para ello un multímetro digital (Keithley 197) conectado en serie con la fuente de voltaje. Las mediciones fueron hechas a intervalos de tiempo de 1 minuto. La figura 6 muestra el arreglo experimental donde se realizaron las difusiones. El proceso se detiene cinco minutos después de haber obtenido la corriente máxima, debido a que se considera que la fuente de iones se ha agotado en este punto.

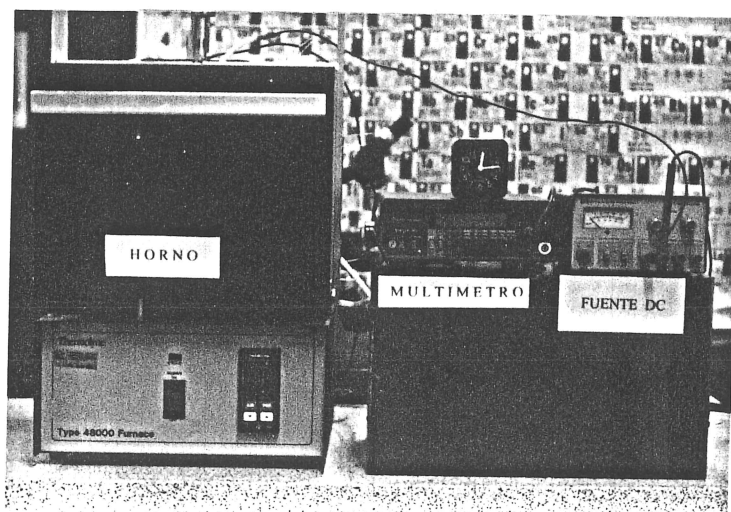


Figura 6.- Se observa el montaje experimental donde se realizó el proceso de difusión.

Se fabricaron alrededor de 80 guías de onda ópticas, de las cuales se seleccionaron cuatro de las mejor comportadas para ser presentadas en éste trabajo. En la tabla I se observan las condiciones aplicadas a éstas muestras durante el proceso de difusión.

Muestra	Voltaje (Volts)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)
G4	30	350	25
G13	30	350	60
G15	30	350	77
G18	30	350	100

Tabla I.- Se observan las condiciones experimentales que se aplicaron a cada muestra.

alcanzando un valor máximo de corriente, después de éste valor máximo, la corriente empieza a disminuir debido a que la fuente de iones se ha agotado.

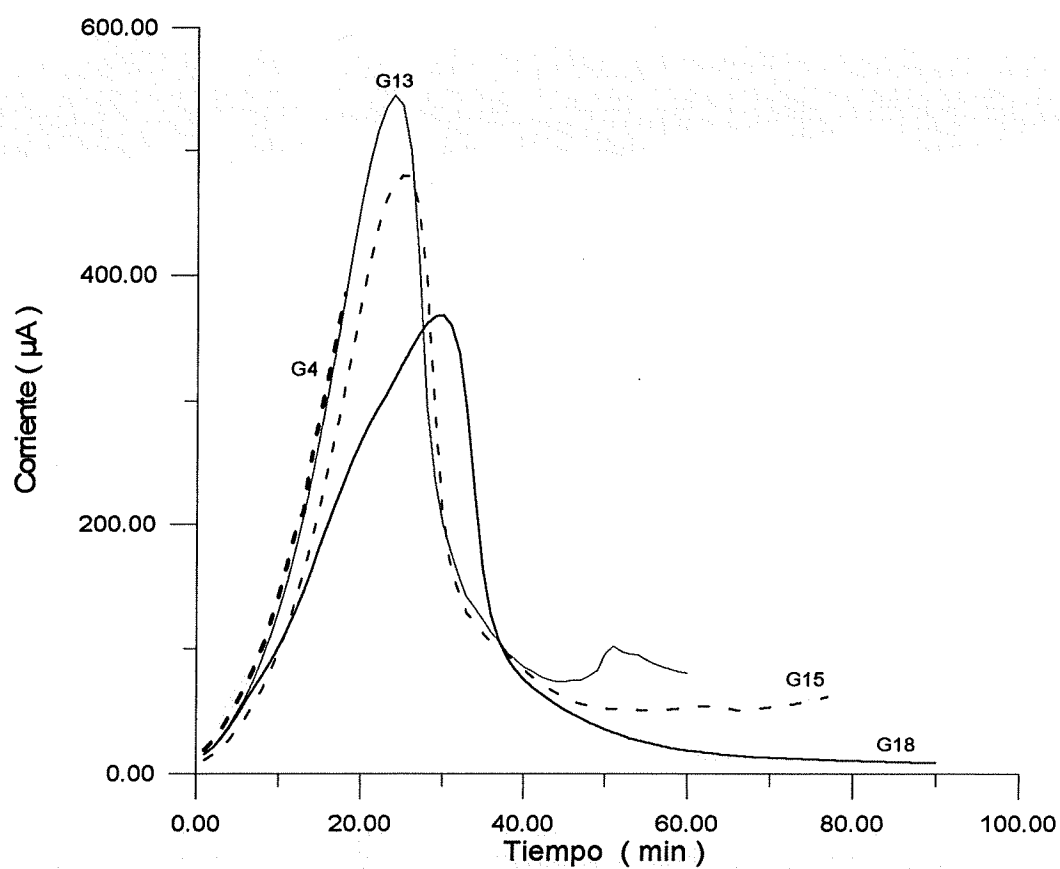


Figura 7.- Curvas obtenidas experimentalmente Tiempo Vs corriente.

III.4.- CARACTERIZACION MODAL

Para comprender mejor los resultados aquí presentados, empezamos detallando el método empleado para caracterizar las muestras. La caracterización se hizo mediante el método de acoplamiento por prisma de alto índice, mostrado esquemáticamente en la figura 8. Un haz de luz incidente entra al prisma a un ángulo θ . En la base del prisma, la luz forma un ángulo ϕ con la normal al prisma.

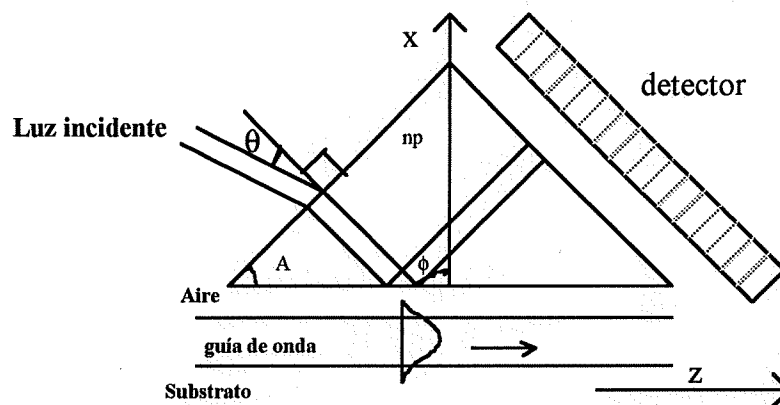


Figura 8.- Técnica de acoplamiento de luz a guías de onda mediante un prisma de alto índice.

El ángulo ϕ determina la velocidad de fase (v_i) en la dirección z del haz incidente en la guía de onda, la cual está dada por la ecuación:

$$v_i = \frac{c}{n_p \sin \phi} , \quad (19)$$

donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre y n_p es el índice de refracción del prisma. Un acoplamiento eficiente de la luz en la guía de onda ocurre solamente cuando seleccionamos el ángulo ϕ tal que v_i es igual a la velocidad de fase v_m de uno de los modos guiados de la guía de onda ($m = 0, 1, 2, \dots$). Si

$$v_m = \frac{c}{N_m}, \quad (20)$$

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

$$N_m = n_p \sin \phi_m, \quad (21)$$

el índice de refracción efectivo es un parámetro básico que caracteriza a un modo guiado.

Para un modo guiado de orden m , el índice efectivo está definido por $N_m = \beta / \kappa$ donde β es la constante de propagación del modo y $\kappa = 2\pi / \lambda$ es el número de onda en el espacio libre.

Bajo la condición de la ecuación 21, ϕ_m es mayor que el ángulo crítico de reflexión interna total en la interfase prisma-aire.

$$\phi_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_p} \right), \quad (22)$$

n_2 y n_p son el índice de refracción en la interfase prisma-aire y prisma respectivamente.

La luz es totalmente reflejada en la base del prisma, y se forma una onda estacionaria en el prisma. En el hueco de aire, existe un campo que decae exponencialmente en la dirección del eje x , procedente del prisma, si éste campo interactúa con el campo del modo guiado, resultará entonces un acoplamiento de la luz incidente en el modo.

N_m está dado por la siguiente relación:

$$N_m = n_p \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_m}{n_p} \right) + A \right), \quad (23)$$

en la ecuación (23) n_p es el índice de refracción del prisma y A es el ángulo de la base del prisma (Najafi, 1992).

La caracterización modal se hizo mediante el acoplamiento como se mencionó anteriormente en un sistema Metricon Model 2010 prism coupler. El prisma que utiliza el sistema tiene un índice de refracción de 1.9648, a la longitud de onda de $\lambda=632.8$ nm.

Los índices efectivos, para los modos TE (transversal eléctrico) que presentaron las guías G13, G15, G18, son presentados en la tabla II. La guía G4 presentó un solo modo de propagación.

Muestra	Modos	Indice TE	Profundidad (μm)
G13	3	1.5804	en la superficie
		1.5682	1.4257
		1.5491	2.0685
		1.5268	2.4626
G15	4	1.5907	en la superficie
		1.5787	1.2626
		1.5627	1.9734
		1.5468	2.4584
		1.5287	2.8214
G18	5	1.5724	en la superficie
		1.5657	1.8752
		1.5538	2.6520
		1.5410	3.3097
		1.5288	3.9466
		1.5167	4.4569

Tabla II.- Se muestra el número de modos, el índice efectivo y la profundidad que presentaron las guías.

Los modos de propagación que aceptaron las guías seleccionadas anteriormente G4, G13, G15 y G18 listados en la tabla II, los podemos presenciar en las figuras 9,10,11 y 12. Ellas se obtuvieron del sistema Metricon 2010 Prism coupler, el sistema realiza un

barrido angular para la luz incidente en la guía y por medio de un detector registra la intensidad del rayo de luz a la salida, dándose cuenta con ésto donde existen modos de propagación que se presentan como mínimos.

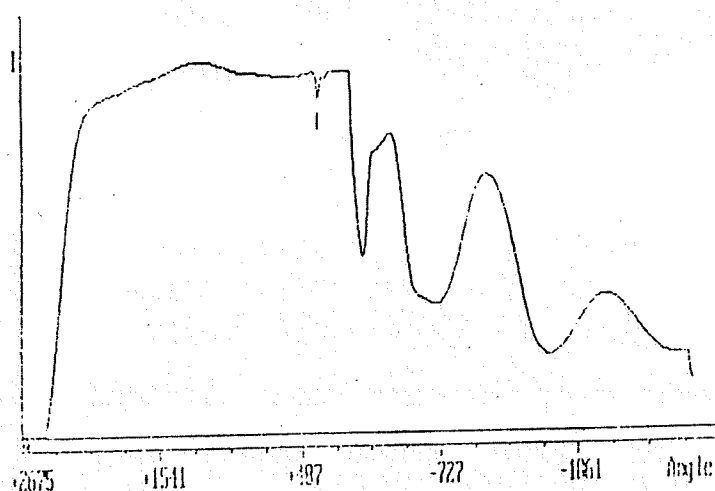


Figura 9.- Se observa el modo que presentó la guía G4.

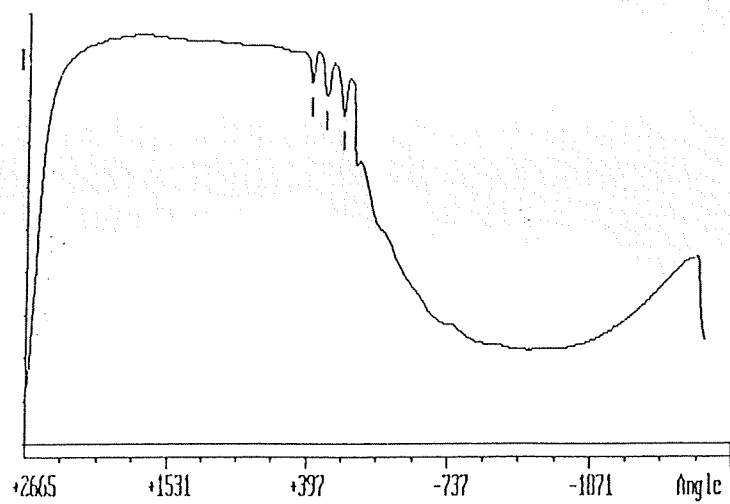


Figura 10.- Se observan los 3 modos que presentó la guía G13.

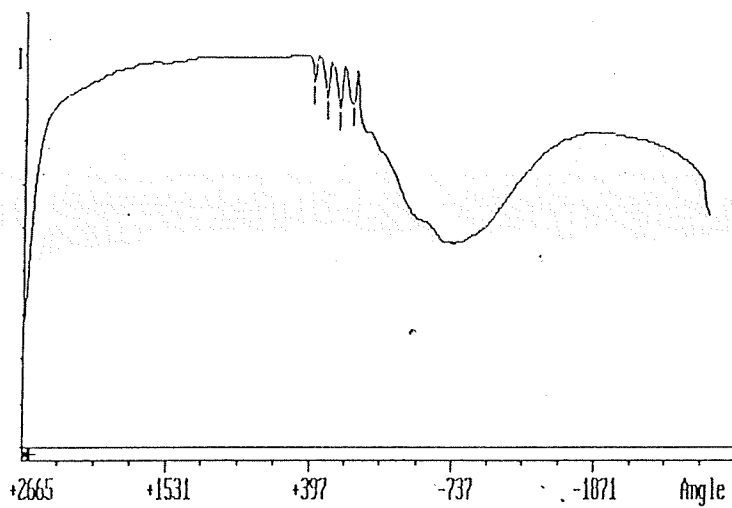


Figura 11.- Se observa los 4 modos de propagación que presentó la guía G15.

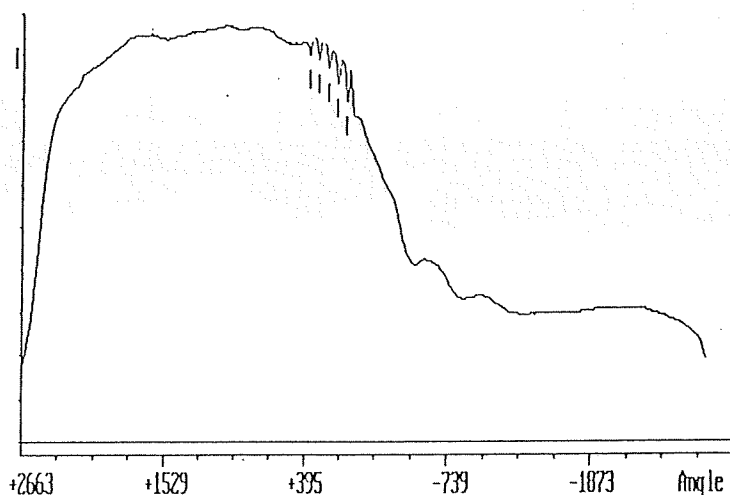


Figura 12.- Se observa los 5 modos de propagación que presentó la guía G18.

III.5.- PERFILES DE INDICE DE REFRACCION.

El método WKB (aproximación de Wentzel-Kramers-Brillouin) puede usarse para calcular las constantes de propagación en guías de onda que presentan un gradiente en el índice de refracción. Los límites de la trayectoria de los rayos son los puntos donde se produce la reflexión total. La constante de propagación $\beta = K_0 n_{efectivo}$ es la componente z del vector de onda y la componente en la dirección x es:

$$K_x = K_0 \cdot \left(\sqrt{n^2(x) - n_{efectivo}^2} \right) \quad (24)$$

El corrimiento en fase total es:

en los puntos de retorno (capa de aire y sustrato respectivamente). Cuando se conocen las constantes de propagación, las cuales se pueden obtener mediante el uso de la técnica de acoplamiento de prisma, se puede invertir la relación WKB para obtener el perfil del índice de refracción.

Se ha desarrollado el método WKB inverso (Chiang, 1985), en el cual a partir de las mediciones de los índices efectivos para una longitud de onda dada, se obtiene mediante interpolación el perfil del índice de refracción.

Los perfiles del índice de refracción obtenidos a partir de las mediciones anteriores para las mismas guías son los mostrados en las siguientes figuras:

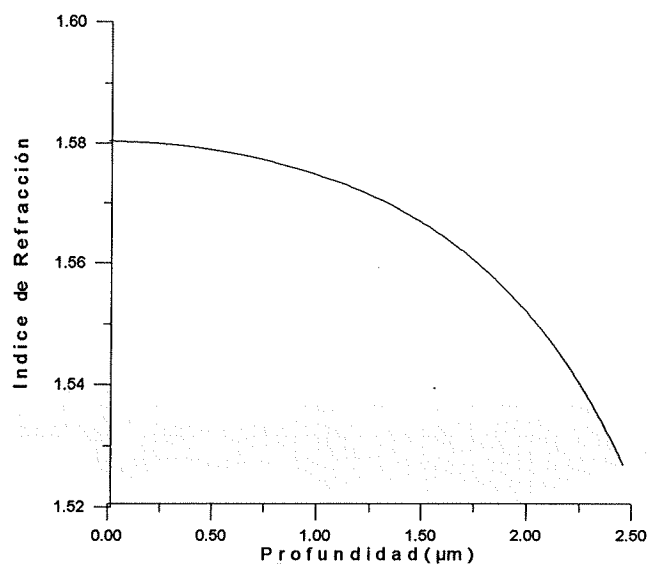


Figura 13.- Se muestra el perfil del índice de refracción para la guía G13.

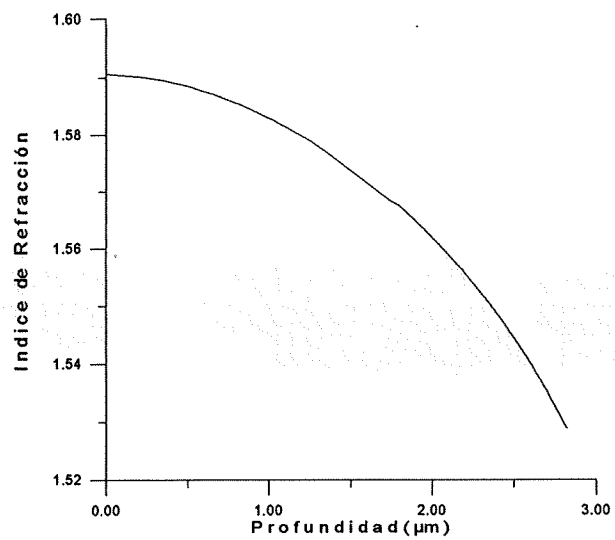


Figura 14.- Se muestra el perfil del índice de refracción para la guía G15.

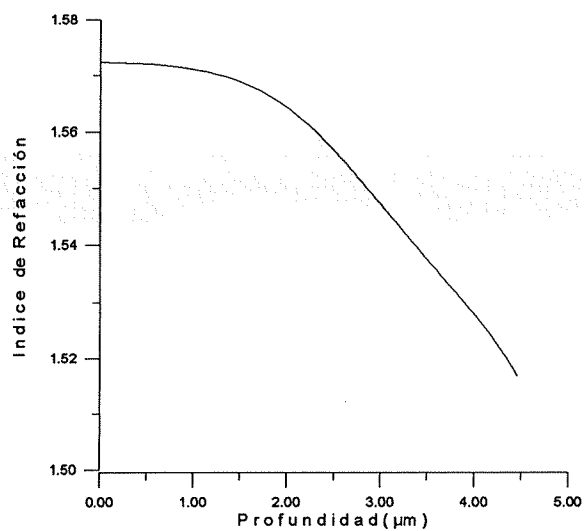


Figura 15.- Se muestra el perfil del índice de refracción para la guía G18.

III.6.- ANALISIS POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

La difusión de iones de cobre para la muestra G4 se verificó por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con sonda de rayos x. Se hizo una búsqueda de cobre en el interior del vidrio; en la figura 16 se muestra como varía la composición química a medida de que uno se va alejando de la superficie. Las mediciones fueron tomadas a intervalos de una micra. Ahí se puede observar como en la región donde existe cobre no hay presencia del sodio y a medida que el cobre disminuye el sodio aumenta.

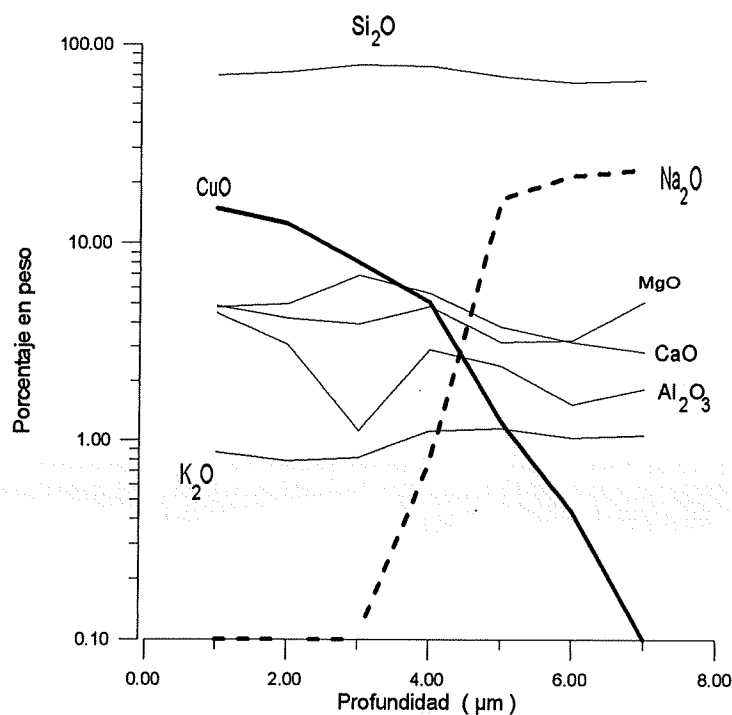


figura 16.- Se observa la concentración del cobre para la guía G4.

IV.- CONCLUSIONES.

Después de varias pruebas experimentales se determinó que las condiciones optimas para realizar la difusión eran a una temperatura de 350°C y a 30V de campo eléctrico externo. A temperaturas menores de 350°C los tiempos de difusión eran muy grandes y a temperaturas mayores el vidrio presentaba deformaciones. La presencia del campo eléctrico convierte el movimiento aleatorio de los iones que se estan difundiendo en un movimiento direccional. En la figura 7 se observa como al inicio de la difusión el flujo de corriente aumenta rapidamente, ya que los iones de cobre se encuentran dispuestos a intercambiarse, transcurrido un cierto tiempo la fuente de iones se ha terminado por lo cuál tenemos una disminución de flujo de corriente.

Al analizar las muestras mediante la técnica de prisma de alto índice fué posible determinar al número de modos que aceptan las guías e inferir de dichas mediciones la presencia de un gradiente en el índice de refracción en el vidrio.

En las figuras 13,14 y 15 vemos como a mayor tiempo de difusión tenemos como resultado guías que presentan más modos, consecuencia de que la difusión llega a una mayor profundidad.

La difusión de iones de cobre para las muestras G4,G13,G15 y G18 se verificó por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) con sonda de rayos x. Técnica mediante la cual se puede apreciar que el perfil de concentración es parecido al que la teoría predice cuando la difusión se realiza asistida por campo eléctrico externo.

Se hizo una búsqueda de cobre en el interior del vidrio, en la figura 16 se muestra el análisis de la guía G4. Ahí se observa como varía la composición química a partir de la superficie. Las mediciones fueron tomadas a intervalos de una micra. Se puede observar como en la región inicial donde existe mayor concentración de cobre no hay presencia del sodio y a medida que el cobre disminuye el sodio aumenta.

Mediante un proceso térmico asistido por un campo eléctrico externo se realizó la difusión de cobre en substratos de vidrio para obtener guías de onda óptica.

Se demostró que es posible fabricar guías de onda ópticas de manera controlada, las condiciones presentadas en la tabla I nos muestran como, seleccionando los parámetros adecuados podremos obtener guías que permitan 1,2,3,4,5 ó hasta más modos, como se observa en la tabla II.

V.- LITERATURA CITADA.

- * Agapiou G. S. and Verber C. M. 1992. Method for measuring the mode-index ratio of two regions in a planar waveguide. *Applied Optics*, 31 (9).
- * Boshtein. B.S. 1980. *Difusión en Metales*. Primera Edición. Editorial Mir. Moscú. 5-65 pp.
- * Born Max and Wolf Emil. 1985. *Principles of Optics*. Sixth Edition. Pergamon Press. New York. 1-70 pp.
- * Chiang K. S. 1985. Construction of Refractive-Index Profiles of Planar Dielectric Waveguides From the Distribution of Effective Index. *Journal of lightwave technology*, 3(2).
- * Findakly T. 1985. Glass Waveguides by Ion Exchange. a review, *Opt.Eng.*, 24: 244-250 pp.
- * Gorty J. E. and Hall D.G. 1986. Fabrication of Planar Optical Waveguides by K Ion Exchange. *Opt.Lett.*, 11: 100-102 pp.
- * Gupta D. K. Vieregge and K. V. Snkrishan, 1992. Copper Diffusion in Amorphous thin Films of 4% phosphorus-Silicate Glass and Hydrogenated Silicon Nitride. *Appl. phys. lett.* 61(18).
- * Honkanen S. and Ternoven. A. 1988. Experimental analysis of Ag^+ - Na^+ exchange in glass with Ag film ion sources for planar optical waveguide fabrication. *J. Appl. Phys.* 63(3).

- * Fernandez Navarro José Maria. 1985. El Vidrio: Constitución, Fabricación, Propiedades. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ceramica y Vidrio. Primera Edición. Madrid. 47-64 pp.
- * Koshiba Masanori. 1990. Optical Waveguide Analysis. first Edition. Tokyo. 1-12 pp.
- * Ludwing R. 1989. Integrated Optical Components in Substrate Glasses. Glastech. Ber., 62: 285-297.
- * Lerma Aragón Jesús Ramón. 1992. Fabricación y Caracterización de Guías de Onda ópticas, Sobre Substratos de Vidrio.
- * Morey, G. W. 1945. The Properties of Glass. Edit. Reinhold Publishing Corporation, New York.
- * Najafi S. I. Suchiski P. G., and Ramaswamy R. V., 1986. Silver Film-Diffused Glass Waveguides: Diffusion Process and Optical Properties, IEEE Journal of Quantum Electronics, Qe-22(12).
- * Najafi S. Iraj. 1992. Introduction to Glass Integrated Optics. Primera Edición. Norwood MA. 1-169 pp.
- * T. Tamir. 1985. Topics in Applied Physics, Integrated Optics. 1979. Second Edition. New York. 84-133 pp.