

# Estudio de Guías de Onda Angostas de Índice de Gradiente y sus Aplicaciones

## *Study of Gradient Index Channel Waveguides and their Applications*

Heriberto Márquez, Jéssica L. Angel Valenzuela, L. Javier Villegas Vicencio, Néstor Valles Villareal, Rocío Cardoso, Alma L. Sánchez y David Salazar

Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada  
Departamento de Óptica Km. 107 carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, Baja California, México  
E-mail: hmarquez@cicese.mx

*Artículo recibido en Junio 18, 2001; aceptado en February 19, 2002*

## Resumen

*En este trabajo se presentan resultados de la obtención de guías de onda ópticas por medio de procesos de difusión de iones de cobre. Se hace énfasis en su compatibilidad con fibras ópticas monomodales para las líneas de comunicaciones ópticas 1310 nm/1550 nm. Así mismo, se presentan resultados preliminares del diseño de derivadores tipo Y y acopladores ópticos.*

**Palabras clave:** Índice de de Gradiente, Guías de Onda Angosta.

## Abstract

*Optical Waveguides made by copper ion-exchanged diffusion on soda-lime glass substrate are presented. Analysis of their coupling efficiency with single mode fiber optic specially for communications wavelengths (1310 nm/1550 nm) are discussed. Therefore, preliminary results in design of splitters and directional coupler, both in optical domain, have been included.*

**Keywords:** Graded Index Optics, Channel Waveguides.

## Introducción

En el comienzo de los 80's se reconoció que la tecnología óptica podría ser el futuro de las telecomunicaciones.

Que solamente esta tecnología podría tener la capacidad de manejar el volumen de alta calidad, multicanal, de audio y tráfico de datos del siglo siguiente (Najafi, 1994).

En 1969 S.E. Miller propuso el concepto de óptica integrada definiéndolo como una nueva generación de sistemas optoelectrónicos en los cuales los cables y alambres son reemplazables por circuitos de óptica integrada; en estos circuitos la señal es transportada por medio de un haz de luz en vez de una corriente eléctrica y los diversos elementos del circuito se interconectan sobre el substrato mediante guías de onda ópticas (Miller, 1969). Los dispositivos de óptica integrada son ahora considerados para otras aplicaciones, además de comunicaciones ópticas, por ejemplo: sensores ópticos y computadoras ópticas (Tabib-Azar and Beheim, 1997).

Uno de los primeros trabajos en guías de onda ópticas fueron realizados en 1972 por Izawa y Nakagome (1972); éstos abrieron el camino a una gran actividad de investigación y desarrollo, lo que ha permitido la fabricación en serie de componentes y dispositivos comerciales de óptica integrada (Righini, 1994).

Los circuitos pasivos de óptica integrada están constituidos por tres celdas unitarias básicas: líneas rectas, función Y, y acopladores direccionales. Circuitos pasivos de óptica integrada tales como: divisores de potencia, interferómetros, multiplexores y demultiplexores, pueden ser fabricados y diseñados con las componentes básicas anteriores (Najafi, 1994).

El desarrollo de circuitos pasivos de óptica integrada sobre substratos de vidrio de años recientes, emerge como una de las técnicas más prometedoras para producir una guía de onda con las siguientes características: inmunidad al daño óptico, bajas pérdidas de propagación, acoplamiento con interfases de fibra óptica comerciales y potencialmente bajos costos de producción (Najafi, 1992).

En este trabajo se presentan resultados de la obtención de guías de onda ópticas fabricadas por difusión de iones de cobre en vidrio y sus aplicaciones. Estos incluyen guías de onda angostas, funciones tipo Y, y acopladores direccionales.

## 2 Difusión de iones de cobre en vidrio

En guías de onda de intercambio iónico, la naturaleza de los perfiles de índice de refracción está determinada por el proceso de fabricación y los perfiles de las guías de onda, son delineados por procesos de difusión de iones complicados. Debido a esto, el modelado de un proceso de intercambio iónico es importante. Para conectar el proceso de intercambio iónico y las propiedades ópticas de las guías de onda, es necesario el conocimiento de la relación entre la concentración de iones y la distribución de índice de refracción. Con los perfiles de índice de refracción conocidos de las guías de onda, la teoría de propagación óptica en guías de onda puede ser aplicada para modelado de las propiedades ópticas de guías de onda y diseño de componentes de óptica integrada (Villegas-Vicencio et al., 2001). El sumergido del modo de propagación de la guía de onda es una meta deseable para guías de onda en vidrio. Debido a que éstas son generalmente usadas como componentes pasivos, el acceso a la energía óptica guiada desde la superficie del sustrato no es usualmente necesaria. Al mismo tiempo, una guía de onda profunda reduce las pérdidas por esparcimiento asociadas con la rugosidad superficial y mejora el acoplamiento modal de las guías de onda a fibras ópticas (Sánchez, 1999).

Guías de onda profundas pueden ser obtenidas por medio de procesos de difusión de iones tipo multietapas (por ejemplo difusión primaria, difusión secundaria y tratamiento térmico). En este caso, los iones desplazados del vidrio en el primer intercambio son reintroducidos desde la superficie en un intercambio subsecuente. Esto no es tan trivial como suena, debido a que las propiedades del vidrio han cambiado drásticamente en la capa intercambiada (zona sujeta a difusión). El segundo intercambio puede originar esfuerzos, causando daño a la superficie o probar ser mucho más lento para ser práctico. En algunos casos esos problemas pueden ser reducidos por usar baños de sales multicomponentes que rellenan o reconstruyen la superficie del vidrio mejor que después del intercambio inicial. Mucho de este tipo de trabajo aun involucra ensayo y error debido a que la cinética del intercambio iónico, para estos fines, es un tópico pobremente entendido.

En vez de sumergir el núcleo de la guía de onda, por ejemplo, obtenido por difusión primaria, debajo de la superficie, existe una alternativa viable que puede ser usada para simetrizar y sumergir el modo. Comenzando de un perfil apropiado, un simple procedimiento de recocido redistribuye los iones dopantes sobre una sección transversal más grande y circular, y el modo óptico resultante acopla muy bien con el modo de las fibras ópticas estándar. Además, son reducidas las pérdidas

de potencia óptica en la interfase aire-vidrio. Este recocido es hecho simplemente por introducir el sustrato en el horno precalentado después del intercambio iónico inicial (Albert and Lit, 1990).

El proceso de difusión en vidrio es la técnica que más se utiliza para fabricar guías de onda con índice de gradiente. La forma como evoluciona la distribución de la concentración de los iones en el vidrio durante el proceso de difusión es explicada mediante la teoría de difusión. El cambio de concentración  $C$ , durante un proceso de difusión asistido por campo eléctrico como función del tiempo, puede obtenerse de la segunda ley de Fick (Najafi, 1992),

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{D\nabla^2 C}{C(M-1)+1} - \frac{D(M-1)(\nabla C)^2 + M\bar{J}_0 \cdot \nabla C}{(C(M-1)+1)^2}, \quad (1)$$

donde  $M = D_B/D_A$ , es la razón de las constantes de difusión, los subíndices  $B$  y  $A$  corresponden respectivamente a los iones entrantes ( $\text{Cu}^+$ ) y a los iones que originalmente están en la red vítrea ( $\text{Na}^+$ ),  $D$  es el coeficiente de difusión de los iones entrantes,  $C(x, y, t) = c(x, y, t)/c_0$  es la concentración relativa,  $c_0$  es la concentración original de los iones de sodio en el vidrio y  $\bar{J}_0$  es la densidad de corriente eléctrica.

La ecuación 1 puede resolverse mediante métodos de diferencias finitas y para obtener precisión en los resultados se puede considerar que los coeficientes de difusión dependen de la concentración, que las condiciones de frontera son dependientes del tiempo y que los iones tienen diferentes movibilidades.

Para llevar a cabo este trabajo, fue necesario realizar inicialmente una serie de pruebas previas por medio de simulación, y de esta manera, conocer los parámetros (tiempo, temperatura y voltaje) del proceso de difusión. Además de calcular la eficiencia de acoplamiento de las guías de onda con fibras ópticas y a partir de este conocimiento es posible predecir los resultados experimentales (Sánchez, 1999).

Como ha sido ampliamente descrito, una de las metas de este trabajo, es la obtención de guías de onda angostas que tengan alta eficiencia de acoplamiento con fibras ópticas monomodales; en las líneas de comunicaciones ópticas (1310 nm/1550 nm). Para lograr lo anterior, es necesario que el modo de propagación de la guía sea lo más cercano al modo de propagación de la fibra óptica. En la literatura se sugiere que guías de onda con este comportamiento pueden ser obtenidas por medio de procesos de difusión primaria y secundaria con o sin asistencia de campo eléctrico. Estudios teórico-experimentales preliminares en guías de onda angostas, indican que es factible lograr el empataamiento de modos fibra-guía con los siguientes procesos: a) difusión primaria de una película de Cu de 4  $\mu\text{m}$  de

espesor a una temperatura de  $350^{\circ}\text{C}$ , asistida por un campo de  $30\text{ V/mm}$ , durante un tiempo de 60 minutos; seguida de una de las siguientes difusiones: b) difusión secundaria con baño de sales ( $\text{NaNO}_3$ ) con una temperatura de  $350^{\circ}\text{C}$  durante 60 minutos o c) difusión secundaria con baño de sales asistido por campo eléctrico de  $30\text{ V/mm}$ , a  $350^{\circ}\text{C}$  durante 60 minutos (Cardoso, 2000; Angel-Valenzuela et al., 2001; Valles-Villarreal et al., 1999; Salazar et al., 1997; Salazar et al., 1999).

La simulación de las difusiones primaria y secundaria, proporciona el caso idóneo de la profundidad de una guía de onda. El proceso primario brinda un perfil superficial de difusión de iones con una forma semicircular con dimensiones de aproximadamente  $8\ \mu\text{m}$  de ancho por  $3\ \mu\text{m}$  de profundidad, tal como se muestra en la figura 1(a). El proceso secundario con difusión de baño de sales, proporciona un perfil de difusión de iones ovalado con dimensiones aproximadamente de  $9\ \mu\text{m}$  de ancho y  $4\ \mu\text{m}$  de profundidad, con centro a  $3\ \mu\text{m}$  a partir de la superficie de la guía de onda; mientras que para el proceso de baño de sales asistido por campo eléctrico, el perfil es aún más profundo ( $\sim 7\ \mu\text{m}$ ). La diferencia entre perfiles es notable en las figuras 1(b) y 1(c). El método de diferencias finitas proporciona la distribución de intensidad del modo que emerge de la guía de onda, brindando un comportamiento similar para ambas difusiones secundarias con o sin campo eléctrico. En la figura 1(d) se presenta el perfil de distribución de intensidad que emerge de la guía de onda.

### 3 Acoplamiento fibra óptica - guía de onda

En diseño de sistemas de comunicaciones ópticas, uno de los más grandes problemas es reducir las pérdidas por acoplamiento óptico de una fibra a una guía de onda, especialmente en sistemas de transmisión de luz monomodal; estas tienden a ser grandes, debido a que es difícil, pero no imposible, empatar el campo óptico de la fibra con el campo asimétrico de la guía de onda. La contribución de pérdidas para una conexión de una fibra con una guía de onda es la suma de cuatro efectos: pérdidas de propagación en la estructura, reflexiones de Fresnel, empatamiento de modos entre fibra - guía y desalineamiento entre fibra óptica y guía de onda (Bourhis, 1994).

Las pérdidas por propagación en la guía de onda dependen de los parámetros de fabricación y diseño de la estructura del circuito. En estudios previos se han determinado dichas pérdidas por un valor de  $1\text{ dB/cm}$  [14]. Así mismo, las pérdidas por reflexión han sido estimadas con un valor de alrededor de  $1\text{ dB}$  (Cardoso, 2000).

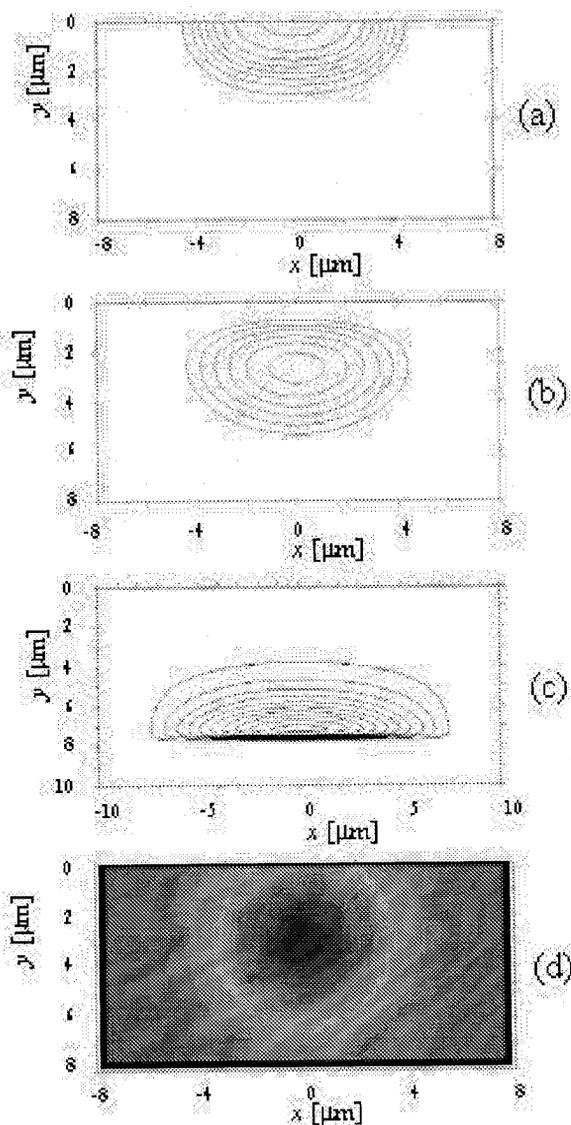


Figura 1: Representación gráfica de los perfiles de difusión, a) difusión primaria; b) difusión secundaria con baño de sales; c) difusión secundaria con baño de sales asistida por campo eléctrico y d) perfil de distribución de intensidad de luz que emerge de la guía de onda;  $x$  representa la posición lateral, la profundidad está representada por  $y$ .

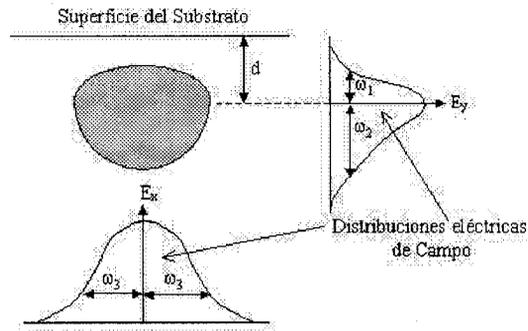


Figura 2: Perfil típico del modo que emerge de la guía de onda.

El desacoplamiento entre los modos de propagación induce pérdidas, ya que los campos transversales producen que el acoplamiento no sea completo. La eficiencia,  $\eta_0$ , es calculada por la conocida integral de cocientes de intensidades.

$$\eta_0 = \frac{\iint |\overline{E}_1 \overline{E}_2|^2 dx dy}{\iint |\overline{E}_1|^2 dx dy \iint |\overline{E}_2|^2 dx dy} \quad (2)$$

En donde  $\overline{E}_1$  y  $\overline{E}_2$  son los campos eléctricos que se propagan en la fibra y en la guía, respectivamente. Esta ecuación expresa el acoplamiento entre los campos eléctricos  $\overline{E}_1$  y  $\overline{E}_2$  de los modos. El modo de la fibra es descrito por una gaussiana circular con cintura  $w_0$  (valor típico de  $4.5 \mu\text{m}$  para fibra monomodo en longitudes de onda de  $1310 \text{ nm}/1550 \text{ nm}$ ). El modo de la guía depende considerablemente del proceso de fabricación.

En el caso más general, la eficiencia  $\eta_0$ , puede aproximarse por una combinación de mitades gaussianas (ver figura 2);

$$\eta_0 = \frac{\left( \sqrt{w_1} \left( \frac{w_1}{w_0} + \frac{w_0}{w_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \sqrt{w_2} \left( \frac{w_2}{w_0} + \frac{w_0}{w_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2}{\frac{w_1 + w_2}{2} \left( \frac{w_3}{w_0} + \frac{w_0}{w_3} \right)}, \quad (3)$$

donde las cinturas de las intensidades corresponden a  $w_0$  del campo en la fibra,  $w_1$  y  $w_2$  del campo en la dirección  $y$  de la guía; y  $w_3$  del campo en la dirección  $x$  de la guía.

Las pérdidas provocadas por las posiciones relativas de la fibra respecto a la guía, por desalineamiento, ocurren en cada grado de libertad: lateral ( $x$ ), vertical ( $y$ ) y longitudinal (a lo largo de la dirección de propagación  $z$ ). El impacto que tiene el desalineamiento sobre la eficiencia de acoplamiento puede ser derivado de las

ecuaciones 2 y 3. Suponiendo que el núcleo de la fibra está desalineado con la guía de onda por una distancia  $d$ , se obtiene la siguiente eficiencia de acoplamiento,  $\eta$ , dada por

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{2d_x^2}{w_0^2 + w_1^2}\right) \exp\left(-\frac{2d_y^2}{w_0^2 + w_3^2}\right), \quad (4)$$

donde  $d_x$  y  $d_y$  son el desalineamiento vertical y lateral, respectivamente.

En la figura 3(a) se muestran resultados teóricos y en la figura 3(b) se muestran resultados experimentales de la eficiencia de acoplamiento fibra-guía para una longitud de onda de  $1310 \text{ nm}$  y  $1550 \text{ nm}$ .

En la figura 4 se muestra la luz que emerge a la salida de la guía de onda. En ella se pueden apreciar los modos propagados.

## 4 Aplicaciones

Los circuitos pasivos de óptica integrada están constituidos por tres celdas unitarias básicas: líneas rectas, función Y y acopladores direccionales. Esta sección está dedicada al estudio de la función Y y acoplador direccional  $2 \times 2$ .

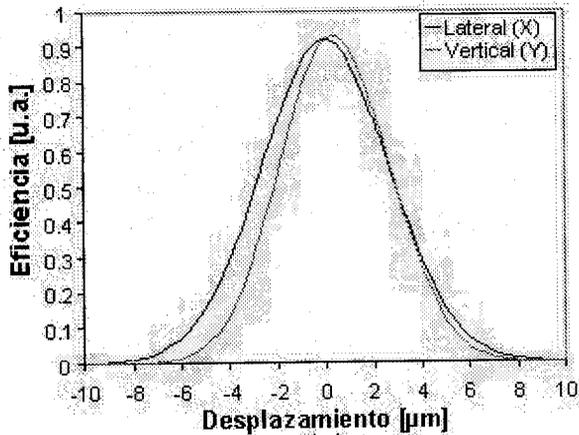
### 4.1 Función Y

Un derivador es en esencia una guía de onda angosta que se bifurca. Puede construirse en base a funciones-Y. La ramificación de la Y puede hacerse con líneas rectas o curvas (Najafi, 1992).

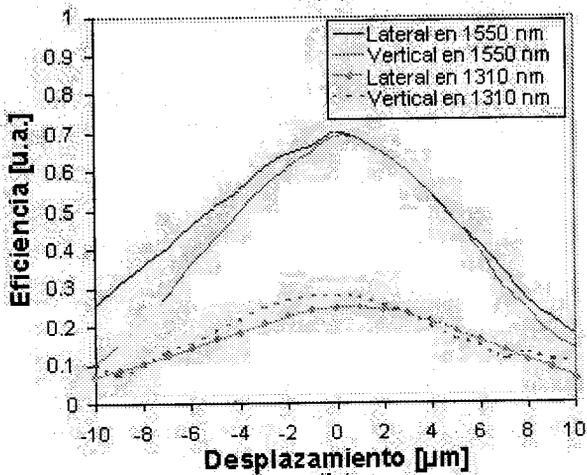
Con la ayuda de un paquete computacional de simulación de circuitos de óptica integrada, se evaluó el desempeño de varios tipos de derivadores 1 a 2 hechos con diversos tipos de curvas. Se encontró que los ramales formados con arcos de circunferencia mantenían un óptimo desempeño al guiar luz de  $1550 \text{ nm}$ , manteniéndose como guía monomodal. Se encontró también que los ramales hechos con líneas curvas evitan cambios bruscos en la dirección de la luz, lográndose un mejor desempeño sobre aquellos hechos con líneas rectas.

Cabe aclarar que al hacer mención de un derivador 1 a 2 se quiere dar a entender que un canal de entrada se ramifica a dos salidas. La importancia de estudiar a fondo a las guías de onda angostas y a los derivadores, radica en que de un entendimiento que ambos puedan tener dependerá el grado de confiabilidad de un probable interferómetro o acoplador direccional, ya que ambos se pueden realizar en base a líneas rectas y curvas.

El diseño del derivador propuesto está hecho a base de guías de onda angostas con formas de líneas rectas y de arcos de circunferencia. Con dichos elementos se



(a)



(b)

Figura 3: Representación gráfica de la eficiencia de acoplamiento vs. desplazamientos de la fibra óptica con respecto a la guía de onda: (a) teóricos y (b) experimentales

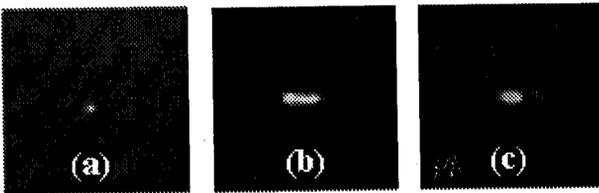


Figura 4: Modos que emergen de la guía de onda después de introducir luz láser. Las fotografías (a) y (b) representan el comportamiento modal para  $\lambda=632$  nm; la fotografía (c) corresponde al comportamiento en  $\lambda=1550$  nm.

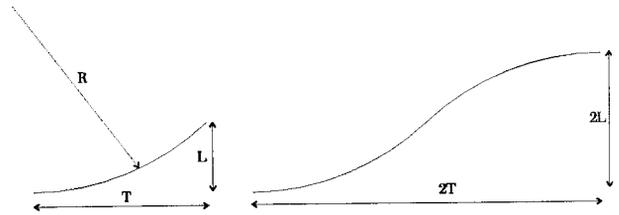


Figura 5: En la figura se exhibe el desplazamiento longitudinal  $T$ , el corrimiento lateral  $L$  y el radio de curvatura  $R$  de un arco de circunferencia, base del diseño de las curvas del derivador propuesto. Los elementos no están a escala.

forman las funciones-Y. Para formar la bifurcación en cada ramal se usan arcos de circunferencia. El radio,  $R$ , el desplazamiento longitudinal,  $T$ , y el corrimiento lateral,  $L$ , se relacionan geoméricamente mediante una expresión dada por

$$T = \sqrt{2RL - L^2} \quad (5)$$

En la práctica, lo que se hizo fue escoger el tamaño de  $2T$  y de  $2L$ , que como consecuencia de ambos resultó el valor de  $R$ . La longitud total de los ramales es de  $2T = 9000 \mu\text{m}$  y el corrimiento lateral por ramal es de  $2L = 125 \mu\text{m}$ , con lo que el radio de curvatura es de  $R = 162031 \mu\text{m}$ .

En la figura 5 se observa un diagrama de lo anteriormente planteado. En la figura de la derecha hay dos arcos encontrados, de esta forma se hace una "s", al juntar dos de ellas a espejo tomando como eje de simetría el que coincide con la medida de  $2T$ , y uniendo un extremo de ambas "s" se formará la función-Y. La ilustración no está a escala, pues en un diseño típico  $T \gg L$ . Con la cantidad de  $2L = 125 \mu\text{m}$ , al poner ambos ramales se llega a una separación entre ellos de  $250 \mu\text{m}$ , la cantidad se eligió así pues es una cantidad que se ha manejado como un estándar comercial para interconexión con fibras ópticas.

El diseño se hace conectando las líneas rectas y la función-Y en forma modular. Primeramente se tiene una línea recta de  $1.55$  cm de longitud, posteriormente se pone la función-Y, que tiene  $0.9$  cm de longitud y finalmente, como terminales se ponen líneas rectas de  $1.55$  cm en cada uno de los dos ramales. Por lo tanto, la longitud total del circuito es de  $4$  cm. La figura 6 es una representación esquemática del mismo.

Otra etapa importante en la evaluación del derivador, es probar como funcionará ante el guiado para diferentes longitudes de onda, para ello hemos desarrollado herramientas computacionales basadas en el método de propagación de haces por la transformada rápida de Fourier, mejor conocido por sus siglas en inglés FFT-

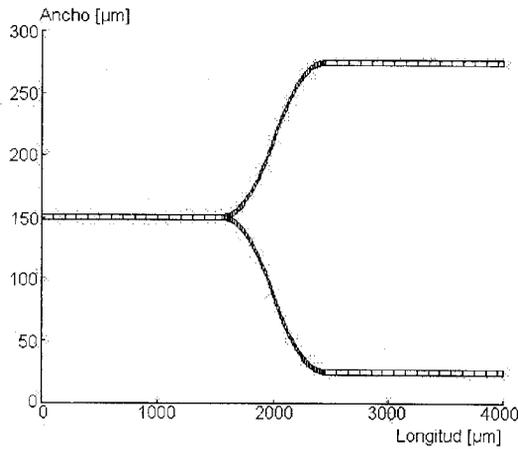


Figura 6: Esquema del derivador 1 a 2 (no está a escala)

BPM (Villegas-Vicencio et al., 2001). En la figura 7 se muestra la propagación de luz para una longitud de onda de 1550 nm.

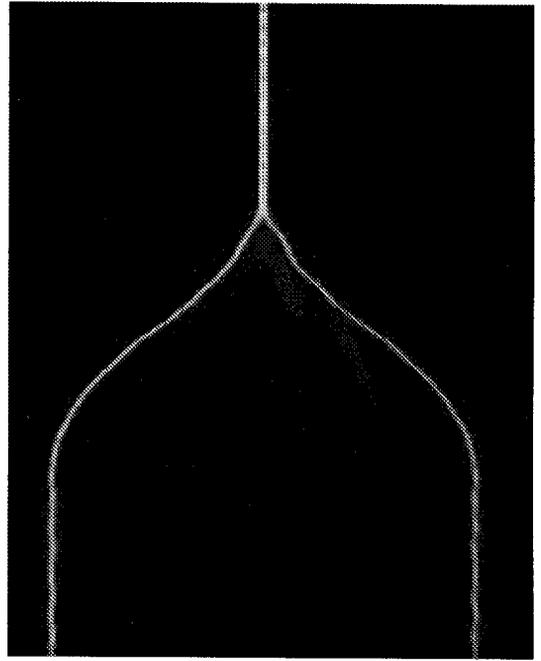


Figura 7: Simulación de la propagación de luz en un derivador 1 a 2 para  $\lambda = 1550$  nm.

## 4.2 Acoplador direccional

Los acopladores de guías de onda ópticas son dispositivos claves para la tecnología de circuitos de óptica integrada. Varios tipos de acopladores de guías de onda han sido propuestos para circuitos de óptica integrada. Ellos han sido fabricados por diferentes técnicas, por ejemplo usando guías tipo cinta, fibras ópticas y difusión de iones. Los acopladores ópticos direccionales fabricados por difusión de iones son los más atractivos tecnológicamente, debido a las bajas pérdidas de propagación y relativa facilidad de fabricación. Para diseñar estos acopladores direccionales, los parámetros involucrados en el acoplamiento (índice de refracción, espaciado entre guías, distancia de difusión lateral y longitud de onda), deben ser considerados en detalle. Aquí se presentan los resultados de diseño de acopladores direccionales de 2x2 simétrico (50/50), obtenidos por difusión de iones de cobre en vidrio y operando a una longitud de onda  $\lambda = 1550$  nm en forma monomodal. El funcionamiento de este tipo de dispositivos de óptica integrada, depende totalmente de la región de acoplamiento, mostrada en la figura 8. En ésta región se efectúa la transferencia de potencia de una guía hacia otra mediante el efecto de túnel óptico. La longitud de acoplamiento,  $L_c$ , para que la transferencia de luz sea de 100% desde una guía hacia la otra, depende de la diferencia entre las constantes de propagación del modo simétrico ( $\beta_o$ ) y asimétrico ( $\beta_e$ ) soportados en el par de guías de onda. El desfase de los modos simétrico y asimétrico es  $\pi$  para una  $L_c = [\pi/(\beta_e - \beta_o)]$ . Con la

finalidad de determinar la influencia de la longitud de acoplamiento sobre la potencia de salida de los ramales del acoplador direccional, se realizaron diseños de acopladores direccionales variando la longitud de acoplamiento desde  $L = 100 \mu\text{m}$  hasta  $L = 3800 \mu\text{m}$ . Se determinó la propagación de la luz a través del circuito mediante el método de propagación de haz, y se calcularon las potencias de salida de los ramales. Los resultados indican que la razón de la división de potencia varía con la longitud de interacción de esos acopladores. En un acoplador direccional simétrico ideal, la razón de división de potencia entre las dos partes de salida esta dada por:

$$\frac{P_1}{P_1 + P_2} = \cos^2 \left( \frac{\pi z}{2L_c} \right), \quad (6)$$

donde  $P_1$  es la potencia permaneciendo en la guía de onda de entrada,  $P_2$  es la potencia transferida a la otra guía de onda,  $z$  es la dirección de propagación y  $L_c$  es la longitud de acoplamiento (longitud de transferencia total).

Con los resultados anteriores, se diseñó un acoplador direccional con una potencia de 50/50 a la salida de las guías  $g_1$  y  $g_2$ , con una longitud de interacción de 1074  $\mu\text{m}$ . Normalmente se requiere que este tipo de dispositivos tengan capacidad para ser conectados por terminales de fibra óptica, que tienen un diámetro externo en la cubierta de 125  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, el acoplador se

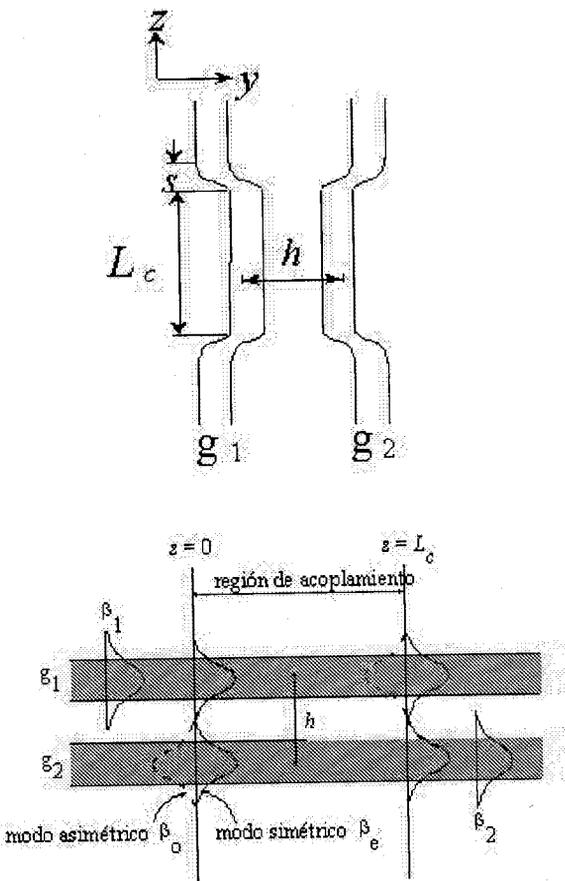


Figura 8: Región de acoplamiento para el acoplador direccional simétrico.

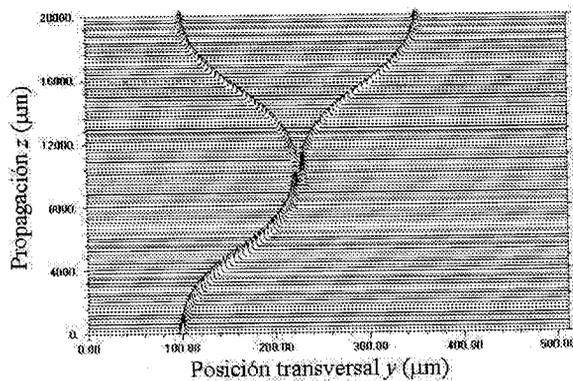


Figura 9: Propagación de luz a través del acoplador direccional

diseño con una separación en los extremos de  $250 \mu\text{m}$  de centro a centro, ya que una de las técnicas mecánicas para colocar las terminales de fibra óptica a circuitos de óptica integrada es por medio de bloques fijadores con canales tipo V con separación estándar de  $250 \mu\text{m}$  (Bourhis, 1994).

Los parámetros de diseño del acoplador direccional simétrico son: curvatura "s" de  $9463 \mu\text{m}$ , longitud de acoplamiento de  $1074 \mu\text{m}$ , separación en la región de acoplamiento de  $10 \mu\text{m}$ , separación en los extremos de  $250 \mu\text{m}$  y longitud total del circuito de  $2 \text{ cm}$ .

La propagación de la luz a través de todo el circuito y la potencia de salida se muestran en la figura 9. El modo excitado fue el modo  $\text{TE}_{00}$  de una fibra óptica monomodal a una longitud de onda  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  y con una cintura de  $5.5 \mu\text{m}$ .

## 5 Conclusiones

Se han obtenido guías de onda angostas de índice de gradiente mediante procesos de difusión de cobre, que presentan una adecuada eficiencia de acoplamiento (70%) con fibras ópticas monomodales. Se presentan diseños de circuitos de óptica integrada: derivador óptico 1 a 2 y acoplador direccional simétrico 2x2; los cuales presentan capacidad de ser conectados con fibras ópticas comerciales.

## Agradecimientos

Al CONACYT por el financiamiento económico otorgado al proyecto 28124-A.

Al técnico Javier Dávalos por su apoyo en el proceso de corte, esmerilado y pulido de terminales de guías de onda.

## Bibliografía

**Albert J. and J.W.Y. Lit**, "Full modeling of field-assisted ion exchange for graded index buried channel optical waveguides", *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 18, 1990, pp. 2798-2804.

**Angel-Valenzuela J.L., A. L. Sánchez, R. Cardoso, L. J. Villegas-Vicencio, D. Salazar and H. Márquez**, "Integrated optical temperature transducer type Fabry-Perot", *Research and development*, 2001 (en arbitraje).

**Bourhis J.F.**, en *Glass Integrated Optics and Optical Fiber Devices*, Ed. Najafi, S.I., SPIE, CR53, 1994.

**Cardoso R.**, *Estudio de la eficiencia de acoplamiento a fibra-guía de onda*, Tesis de Maestría, CICESE, 2000.

**Izawa T.**, and **Nakagome H.**, "Silver Ion-Exchanged Glass Waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 21, No. 12, 1972, pp. 584.

**Miller, S.E.**, "Integrated optics: An introduction", *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.48, No. 7, 1969, pp. 2059-2069.

**Najafi, S.I.**, *Introduction to Glass Integrated Optics*, Artech House, Inc., 1992.

**Najafi S.I.**, *Glass Integrated Optics and Optical Fiber Devices*, SPIE CR53, 1994.

**Righini, G.** *Glass Integrated Optics and Optical Fiber Devices*, Ed.Najafi, S.I., SPIE CR53, 1994.

**Salazar D., H. Porte and H. Márquez**, "Optical channel waveguides by copper ion-exchange in glass", *Appl. Opt.*, Vol. 36, No. 34, 1997. pp. 8978-8991.

**Salazar D, A. Villalobos, H. Porte, L.J. Villegas-Vicencio and H. Marquez**, "Propagation losses of copper-ion exchanged channel optical waveguides", *J. Mod. Opt.*, Vol. 46, No. 4, 1999, pp. 657-665.

**Sánchez A.L.**, *Estudio de Guías de Ondas Ópticas Angostas*, Tesis de Maestría, CICESE, 1999.

**Tabib-Azar M.**, and **Beheim G.**, "Modern trends in microstructures and integrated optics for communication, sensing and actuation", *Opt. Eng.* Vol. 36, 5, 1997, pp. 1307-1318.

**Valles-Villarreal N, A. Villalobos and H. Márquez.**, "Stress in copper Ion-Exchanged Glass Waveguides", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, No. 4, 1999, pp. 606-612.

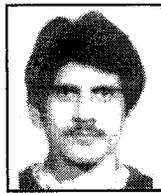
**Villegas-Vicencio L.J., Khomenko A.V., Salazar D., H. Porte y Márquez H.**, "Beam propagation in  $\text{Cu}^+$ - $\text{Na}^+$  ion exchanged channel waveguides", *Rev. Mex. Fis.* 2001 (en prensa).



**Heriberto Márquez**, nació en Ensenada, Baja California, México, en 1961. Obtuvo el título de ingeniero físico en 1983 por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey; y el grado de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias en el CICESE en 1986 y 1990, respectivamente. Actualmente, es Investigador del Departamento de Óptica del CICESE; sus áreas de estudio son: dispositivos de óptica integrada en vidrio. Es el líder del grupo de Óptica Integrada en CICESE.



**Jessica L. Angel Valenzuela**, nació en Tepic, Nayarit, México en 1974. Obtuvo el título de ingeniero en sistemas computacionales en 1997 en el Instituto Tecnológico de Tepic y el grado de Maestro en Ciencias en 1999 en el CICESE. Actualmente se encuentra laborando el Departamento de Óptica del CICESE; sus áreas de estudio son: películas delgadas, dispositivos de óptica integrada en vidrio, divisores de potencia y acopladores en fibra óptica.



**Luis Javier Villegas Vicencio**, nació en la ciudad de México, en 1968. Obtuvo el título de físico en 1995 en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y el grado de Maestro en Ciencias en 1996 en el CICESE. Actualmente se encuentra estudiando el grado de doctorado en el CICESE. Sus áreas de interés están dirigidos al estudio, diseño y caracterización de circuitos pasivos de óptica integrada en vidrio.



**Rocío Cardoso**, nació en la ciudad de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí en 1975. Obtuvo el título de ingeniero electrónico en 1997 en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y el grado de Maestro en Ciencias en 2000 en el CICESE. Trabajó en el área de acoplamiento entre guías de onda y fibras ópticas en el Departamento de Óptica del CICESE.



**David Salazar**, nació en Ensenada, Baja California, México en 1958. Obtuvo el título de físico en 1985 en la Universidad Autónoma de Baja California, México, y el grado de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias en el CICESE en 1987 y 1998, respectivamente. Actualmente, es Investigador del Departamento de Óptica del CICESE; sus áreas de estudio son divisores de potencia y acopladores en fibra óptica y dispositivos de óptica integrada en vidrio.

**Néstor Valles Villarreal**, nació en Valle Hermoso, Tamaulipas, México en 1972. Obtuvo el título de físico en 1994 en la Universidad Autónoma de Nuevo León y el grado de Maestro en Ciencias en 1996 en el CICESE. Actualmente se encuentra realizando estudios de doctorado en la Universidad de Franche-Comté, Besançon, Francia.

**Alma L. Sánchez**, nació en la ciudad de Puebla, Puebla en 1973. Obtuvo el título de licenciado en electrónica en 1999 en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y el grado de Maestro en Ciencias en 1999 en el CICESE. Actualmente se encuentra laborando en la iniciativa privada.

