

Análisis de birrefringencia modal en guías de onda ópticas planares de índice de gradiente obtenidas mediante la difusión de iones de cobre en vidrio

N. VALLES VILLARREAL Y H. MÁRQUEZ

*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Division de Física Aplicada, Departamento de Óptica
km 107 carretera Tijuana-Ensenada, 22860 Ensenada, Baja California, Mexico*

Recibido el 12 de diciembre de 1996; aceptado el 15 de enero de 1997

RESUMEN. Se presenta un trabajo teórico-experimental sobre la birrefringencia modal que presentan guías de onda ópticas planares de índice de gradiente obtenidas mediante la difusión de iones de cobre. Se ha seleccionado al cobre como ion dopante y sustituto del sodio en la red vítrea, debido a que tienen un radio iónico similar ($r_{\text{Na}^+} = 0.95 \text{ \AA}$ y $r_{\text{Cu}^+} = 0.96 \text{ \AA}$). En principio, la estructura básica del vidrio no presenta un incremento localizado de volumen como consecuencia del intercambio iónico $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Na}^+$, y el índice de refracción es modificado debido al incremento en la polarizabilidad iónica de la red. Las guías de onda obtenidas presentan bajos esfuerzos mecánicos y por lo tanto baja birrefringencia, lo que las hace potencialmente utilizables en dispositivos de óptica integrada insensibles a la polarización.

ABSTRACT. We present a theoretical-experimental work about modal birefringence of the graded index optical planar waveguides obtained by copper-ions-difusion in glass (soda-lime). Copper has been selected as doping ion and substitute of the sodium in the glass network because of that they have a similar ion radius ($r_{\text{Na}^+} = 0.95 \text{ \AA}$ y $r_{\text{Cu}^+} = 0.96 \text{ \AA}$). In principle, the basic structure of the glass does not present a localizing increment of volume as a result of the ion exchange $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Na}^+$, and the refractive index is modified due to the increase of the ionic polarizability of the network. The waveguides obtained present very low mechanical stress and therefore very low birefringence, that it does them usable potentially in devices of integrated optics independent to the optical polarization.

PACS: 42.82.Cr

1. INTRODUCCIÓN

Las guías de onda ópticas planares son la base para el desarrollo de dispositivos pasivos de óptica integrada utilizados en el área de comunicaciones ópticas. Los materiales más importantes que se utilizan en óptica integrada para la fabricación de guías de onda planas son, hasta el momento, GaAs, LiNbO₃, LiTaO₃, vidrio y silicio [1]. Sin embargo, el vidrio es el material que se emplea con mayor frecuencia para fabricar guías de onda planas, esto se debe principalmente a la sencillez del manejo que se tiene con el proceso de

fabricación y caracterización. Además, en cuanto al costo, éste es barato en comparación con los materiales mencionados anteriormente. Generalmente, son tres los tipos de óxidos que constituyen al vidrio de silicato, éstos son: a) formadores de red, b) intermedios de red y c) modificadores de red. Estos últimos, son óxidos que aparecen entre los que presentan uniones más débiles (respecto a los otros dos tipos de óxidos) al enlace covalente de los átomos de Si y O que se encuentran en la red vítrea. Esto permite que este tipo de óxidos sean fácilmente reemplazados por cualquier otro átomo (o ion) ajeno a la red vítrea. Existen varios procesos que utilizan este principio de operación [2], sin embargo son sólo dos los que se utilizan con mayor frecuencia, básicamente esto se debe a su sencillez de operación. Estos procesos son: difusión iónica (conocida también como intercambio iónico) a partir de un sólido (película delgada) y baño de sales. En un baño de sales, típicamente el vidrio se sumerge en una sal que contiene iones modificados de red, los cuales son introducidos en el vidrio mediante un tratamiento térmico. En el caso de la difusión iónica, se deposita una película delgada metálica sobre un sustrato de vidrio para utilizarla como fuente de iones. Estos iones se difunden a través de la superficie del vidrio. El principio de operación de esta difusión se basa, principalmente, en dos mecanismos fundamentales, éstos son: una difusión mediante tratamiento térmico y después, para acelerar el proceso, se aplica un campo eléctrico. Sin embargo, ambos procesos generan dentro del vidrio un gradiente en su composición química, lo cual trae como consecuencia un gradiente en el índice de refracción. Este gradiente es el que permite que se genere el efecto de una guía de onda óptica. Desde los primeros trabajos de fabricación de guías de onda en vidrio en 1972 [3], se han realizado progresos en este campo y se han desarrollado diferentes procesos de fabricación.

El proceso de intercambio iónico, el cual involucra dos iones de radios iónicos diferentes, se lleva a cabo a temperaturas por debajo de la temperatura de relajación de los esfuerzos propios del vidrio. Esto trae 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 [4].

Se han fabricado guías de onda de índice de gradiente con Tl^+ , K^+ , Ag^+ , Li^+ , Rb^+ , Cs^+ , etcétera, como iones dopantes y sustitutos del sodio en la red vítrea [5]. Por un lado, se han realizado estudios generales sobre la difusión de iones de cobre en vidrio [6, 7], y en cuanto a la fabricación y caracterización de guías de onda ópticas con Cu^+ realmente existe poco trabajo experimental realizado [4, 8-11], por ello resulta muy motivante la realización del trabajo en esta dirección.

En este trabajo se utilizó vidrio del tipo sódico-cálcico, cuya composición cuenta con un alto contenido en iones de sodio (el Na^+ es un ion modificador). Por otro lado, se ha seleccionado al cobre como ion dopante y sustituto del sodio dentro de la red vítrea, ya que estos tienen radio iónico similar ($r_{Na^+} = 0.95 \text{ \AA}$ y $r_{Cu^+} = 0.96 \text{ \AA}$). Debido a esto, se espera un cambio en el volumen ligeramente pequeño dentro de la red vítrea, generándose bajos esfuerzos mecánicos internos. Estos esfuerzos son los que producen un fenómeno conocido como birrefringencia.

En este trabajo se presentan resultados de birrefringencia modal que presentan las guías de onda ópticas planares de índice de gradiente obtenidas mediante la difusión de iones de cobre en vidrio.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

En el proceso de intercambio iónico binario $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Na}^+$, en sustrato de vidrio, ambos cationes son modificadores de red. El radio iónico del Cu^+ es 0.96 \AA , el cual es similar al radio iónico del Na^+ que es de 0.95 \AA , por lo que el efecto resultante de reemplazar iones de sodio por iones de cobre en la estructura vítrea resulta en la alteración de la composición química. El cambio en el índice de refracción es proporcional a la concentración de iones dopantes introducidos en el vidrio. La variación en el índice de refracción neta depende de tres cambios físicos mayoritarios: polarizabilidad iónica, volumen molar (relacionado con el tamaño iónico) y el estado de esfuerzos creado por la sustitución iónica. Además de estos tres efectos una influencia secundaria sobre el índice es causada por el efecto adicional de la polarizabilidad electrónica de los iones de oxígeno vecinos [5], pero este efecto es tan pequeño que su contribución se desprecia.

La explicación del cambio en el índice de refracción resultante del intercambio iónico está fundamentada sobre el hecho de que los iones participantes en el intercambio tienen diferentes polarizabilidades electrónicas y que ellos ocupan un volumen diferente en el vidrio. Existe un modelo empírico cuantitativo adecuado para predecir el valor del cambio en el índice que resulta del reemplazo de un ion por otro en la composición del vidrio [12]. El modelo básico predice que el valor del índice, $n(x)$, resultante de la sustitución iónica está dado aproximadamente por

$$n(x) = 1 + \frac{R(x)}{V(x)} = 1 + \frac{\sum a_M N_M(x)}{k + b_{\text{Si}} + \sum c_M N_M(x)}, \quad (1)$$

donde N_M es el número de átomos (iones) del tipo M por átomo de oxígeno en el vidrio (M es la componente del óxido M_mO_n); a_M y c_M son las constantes de refracción y volumen, k y b_{Si} son constantes. Los valores para las constantes de volumen, refracción y b_{Si} están dadas en la Ref. 13. Una aproximación muy utilizada del cambio en el índice resultante de la sustitución iónica, $\Delta n_{p/\nu}(x)$, está dada por [12]

$$\Delta n_{p/\nu}(x) \approx \frac{\chi(x)}{V_0} \left(\Delta R_0 - \frac{R_0 \Delta V_0}{V_0} \right), \quad (2)$$

donde $\chi(x)$ es la fracción de los cationes reemplazados por el ion entrante, V_0 es el volumen del vidrio base por átomo gramo de oxígeno (volumen molar), R_0 es la refracción del vidrio base por átomo gramo de oxígeno (refracción molar), $\Delta V_0 = N_{\text{Cu}}(c_{\text{Na}} - c_{\text{Cu}})$ y $\Delta R_0 = N_{\text{Cu}}(a_{\text{Na}} - a_{\text{Cu}})$ son los cambios máximos en el volumen y refracción molar si ocurre un intercambio iónico completo de Cu^+ por Na^+ . De la Ec. (2) podemos ver que existe una relación lineal entre la fracción de iones cobre en el vidrio y el cambio en el índice. Este simple modelo predice que el cambio en el índice, es causado por dos factores: el primer término surge como un resultado de la diferencia en la polarizabilidad iónica de los iones intercambiados, y el segundo término representa la contribución del cambio en el volumen molar del vidrio causado por la diferencia en los radios iónicos de los dos iones [12]. La simplicidad de la Ec. (2) es muy instructiva, sin embargo, hay discrepancias en cuanto al valor calculado de Δn total, ya que la contribución en el índice causada por los grandes esfuerzos que se inducen por el intercambio iónico es

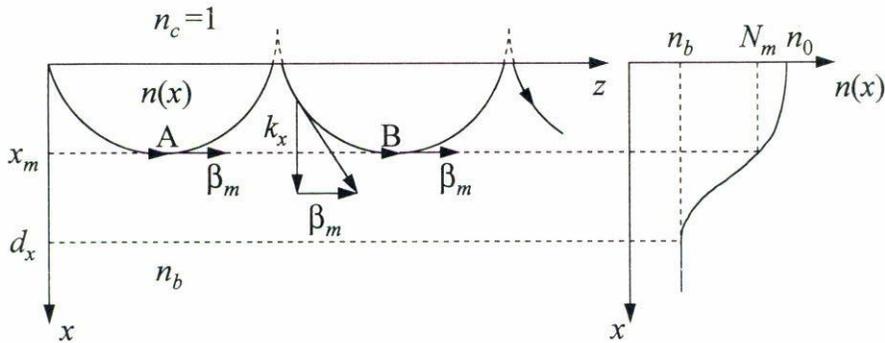


FIGURA 1. Esquema que muestra un perfil de índice de refracción típico en las guías de onda que se obtienen mediante la difusión de iones en vidrio. Se observa la trayectoria seguida por un rayo, la cual toma lugar en los puntos de retorno (A y B). La componente x del vector de onda transversal, k_x , es cero en estos puntos, solo existe la componente z del vector de onda del rayo, β_m . Aquí n_b , N_m y n_0 son el índice de refracción del vidrio base, el índice de refracción efectivo para cada modo de propagación y el índice de refracción superficial, respectivamente. El gradiente que presenta la guía de onda se encuentra solo hasta una profundidad d_x , conocida como profundidad de difusión. En ella, los modos se confinan para propagarse a diferente profundidad x_m , conocida como profundidad modal.

ignorada [5]. Los esfuerzos surgen del hecho de que a bajas temperaturas en las cuales el proceso de intercambio iónico toma lugar (en nuestro caso 350°C), el vidrio está por debajo de su punto de reblandecimiento (510°C para vidrio del tipo sódico-cálcico) [14], y la superficie está libre de expanderse (o contraerse) lateralmente debido a la resistencia del doblamiento del sustrato de vidrio. Es por ello que la única dirección de expansión (o contracción) está en la dirección normal a la superficie y resulta en un levantamiento (o hundimiento) del vidrio [15]. Para tomar en cuenta estas consideraciones en la Ec. (2), hay que contar con la dependencia de la variación en el índice de refracción total sobre el estado de esfuerzo causado por la sustitución iónica [5]. Para esto se considera que el estado de esfuerzo en los planos paralelos a la superficie es uniforme e isotrópico y cero en la dirección normal a estos planos. Entonces, las componentes del tensor esfuerzo son: $\sigma_y(x) = \sigma_z(x) = \sigma(x)$ y $\sigma_x(x) = 0$. El eje x se toma a lo largo de la dirección normal [16], tal como se muestra en la Fig. 1. Por lo tanto, podemos decir que los esfuerzos que se generan en la red vítrea como resultado del intercambio iónico son anisotrópicos. Esta anisotropía lleva como consecuencia, un cambio en el índice debido a esfuerzos (Δn_s) dependiente del estado de polarización de la luz [14, 17-20], esto es

$$\Delta n_s^{\text{TE}}(x) = C_1\sigma(x) + C_2\sigma(x), \tag{3}$$

$$\Delta n_s^{\text{TM}}(x) = 2C_2\sigma(x), \tag{4}$$

donde $\Delta n_s^{\text{TE}}(x)$ y $\Delta n_s^{\text{TM}}(x)$ son los perfiles del cambio en el índice de refracción debido a esfuerzos para las polarizaciones TE y TM (transversal eléctrico y transversal magnético), respectivamente, C_1 y C_2 son los coeficientes elasto-ópticos del vidrio base y $\sigma(x)$ es el perfil de esfuerzo. Dado que el cambio en el índice de refracción total (Δn_t) depende de los tres parámetros físicos mencionados anteriormente, es por ello que

$$\Delta n_t^{\text{TE}}(x) = \Delta n_{p/\nu}(x) + \Delta n_s^{\text{TE}}(x), \quad (5)$$

$$\Delta n_t^{\text{TM}}(x) = \Delta n_{p/\nu}(x) + \Delta n_s^{\text{TM}}(x) \quad (6)$$

donde $\Delta n_t^{\text{TE}}(x)$ y $\Delta n_t^{\text{TM}}(x)$ son los perfiles del cambio en el índice de refracción total para las polarizaciones TE y TM, respectivamente. La razón por la que difieren estos cambios en el índice, se debe principalmente a la anisotropía que presenta el vidrio dentro de su estructura molecular. Esta anisotropía es la que da lugar a un fenómeno conocido como birrefringencia [21], es decir, a la existencia de dos índices de refracción. La birrefringencia es, básicamente, un parámetro que indica qué tanto difieren estos índices de refracción uno del otro. Por tal razón, el perfil de la birrefringencia $\delta n(x)$ se define como

$$\delta n(x) = \Delta n_t^{\text{TM}}(x) - \Delta n_t^{\text{TE}}(x). \quad (7)$$

Sustituyendo las Ecs. (5) y (6) en la Ec. (7), llegamos a la siguiente expresión:

$$\delta n(x) = \Delta n_s^{\text{TM}}(x) - \Delta n_s^{\text{TE}}(x). \quad (8)$$

La sustitución de las Ecs. (3) y (4) en la Ec. (8), implica que la expresión para el perfil de la birrefringencia toma la forma

$$\delta n(x) = (C_2 - C_1)\sigma(x) = B\sigma(x), \quad (9)$$

donde $B(= C_2 - C_1)$ es el coeficiente elasto-óptico relativo (conocido algunas veces como el coeficiente esfuerzo-óptico o como el factor de birrefringencia) del vidrio base [14, 16, 18, 19]. En 1816 Sir David Brewster fue quien demostró que la birrefringencia es proporcional a la intensidad del esfuerzo inducido, tal como lo indica la Ec. (9) [17]. Por lo tanto, de esta manera, el análisis de esfuerzos puede emplearse para explicar la birrefringencia observada en algunas guías de onda que se fabrican en vidrio. Por otro lado, los perfiles de los cambios en el índice de refracción total para las polarizaciones TE y TM se definen como [22]

$$\Delta n_t^{\text{TE}}(x) = n_t^{\text{TE}}(x) - n_b, \quad (10)$$

$$\Delta n_t^{\text{TM}}(x) = n_t^{\text{TM}}(x) - n_b, \quad (11)$$

donde $n_t^{\text{TE}}(x)$ y $n_t^{\text{TM}}(x)$ son los perfiles del índice de refracción total para las polarizaciones TE y TM, respectivamente, y n_b es el índice de refracción del vidrio base. Sustituyendo las Ecs. (10) y (11) en la Ec. (7), se obtiene que

$$\delta n(x) = n_t^{\text{TM}}(x) - n_t^{\text{TE}}(x). \quad (12)$$

La Ec. (12) nos permite calcular, de una manera sencilla y sin analizar propiedades mecánicas, el perfil de la birrefringencia que presentan las guías de onda planas de índice de gradiente. Existen algunas técnicas que se emplean para medir perfiles del índice de refracción [2]. Una de estas técnicas es conocida como el método WKB inverso, el cual fue

primeramente propuesto por White y Heidrich [23], y después mejorado por Chiang [24]. La idea principal es reconstruir el perfil del índice de refracción a partir de los índices de refracción efectivos (N_m), los cuales son medidos, en este caso, mediante la técnica de acoplamiento por prisma de alto índice de refracción. El concepto del índice de refracción efectivo tiene que ver con la manera en la que se propaga la luz dentro de las guías de onda planas de índice de gradiente, esto es, la propagación de la luz se presenta como un número discreto de ondas que se les conoce como eigenmodos o simplemente modos de propagación. Considerando el esquema de la Fig. 1, podemos apreciar que cada modo de propagación tiene un cierto alcance dentro de la guía de onda, que es a lo que se le conoce como profundidad modal (x_m). En cada profundidad modal, se encuentra que algunos componentes del vidrio permanecen en concentraciones inalterables, mientras que las concentraciones de los modificadores de red se modifican. Esto trae como consecuencia una serie de valores discretos en el índice de refracción (debido a la dependencia del índice con la composición), los cuales se les conoce como índices de refracción efectivos. Por tal razón denotamos a dichos índices como $N_m = n_t(x_m)$, donde m es el orden modal, el cual toma valores discretos positivos (0, 1, 2, ...).

En 1985 Chiang [24] propuso un algoritmo matemático, con el cual, mediante la interpolación de los índices de refracción efectivos (N_0, N_1, N_2, \dots), puede ser reconstruido el perfil del índice de refracción. La construcción del perfil con este método para 5 o más modos da resultados muy satisfactorios. Una vez que se obtienen los índices de refracción efectivos, se procede a calcular los valores para la birrefringencia modal (δn_m), con el fin de interpolar dichos valores y así, de esta manera, reconstruir el perfil de birrefringencia.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la fabricación de las guías de onda planas, es muy importante hacer una selección adecuada del sustrato de vidrio que se va a utilizar para el proceso de difusión, ya que el proceso depende significativamente sobre la composición de éste. El requisito está obviamente relacionado con el alto contenido de un ion modificador (alcalino; generalmente se utilizan Na^+ o K^+), con el fin de que permita que el proceso de difusión proceda fácil y rápidamente. En nuestro caso se seleccionaron y utilizaron sustratos de vidrio del tipo sódico-cálcico, cuya composición es (peso en %): SiO_2 (72.08), CaO (6.52), Al_2O_3 (1.26), MgO (3.86), Na_2O (15.32), K_2O (0.796), TiO_2 (0.03), BaO (0.013), B_2O_3 (0.07) y trazas (0.05). El índice de refracción para este vidrio con ésta composición es de $n_d = 1.5139$. Para este trabajo, se depositaron películas de cobre ultrapuro 99.99% (Alfa USA) de $\sim 1 \mu\text{m}$ de espesor, con el propósito de utilizarlas como fuentes de iones. Con el fin de prevenir la oxidación y la fragmentación de la película de cobre durante el proceso de difusión, se depositaron también películas de oro ultrapuro 99.99% (Alfa USA) de $\sim 500 \text{ nm}$ de espesor en ambos lados del sustrato. Esta configuración sirve a su vez como los electrodos (ánodo y cátodo) del sistema en el proceso de difusión. Para llevar a cabo la difusión, introducimos la muestra (sustrato de vidrio con las películas de oro y cobre) a un horno Thermolyne Type 48000 y la dejamos alrededor de unos 20 a 25 minutos para que alcanzara una temperatura de 350°C . Para acelerar el proceso de difusión fue necesario aplicar un campo eléctrico a nuestro sistema una vez que se alcanzó el

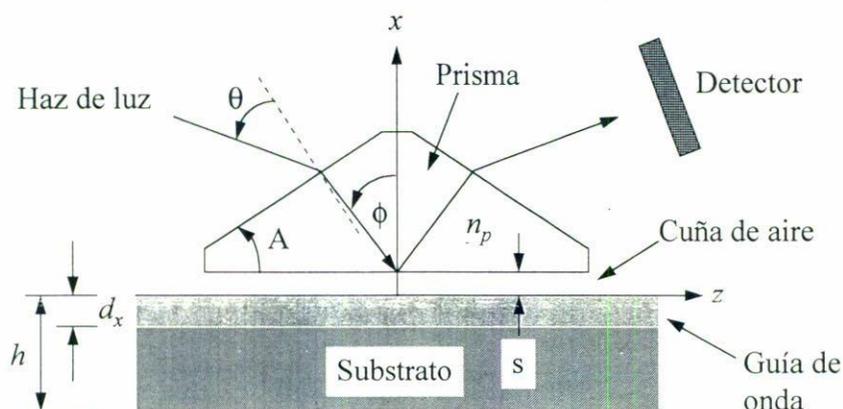


FIGURA 2. Representación esquemática de las principales componentes del equipo que se empleó para la caracterización de los modos de propagación de las guías de onda fabricadas.

equilibrio térmico. Mediante la ayuda de una fuente de voltaje directo Hewlett-Packard 6324A se produjo un campo eléctrico de 30 volts/mm. Con el propósito de conocer la forma en que evoluciona el proceso de difusión, se conectó un multímetro digital Keithley model 197 en serie con la fuente de voltaje. En la memoria del multímetro se registran y almacenan los datos de la corriente (flujo de iones), variando el tiempo de difusión. Los datos se registraron en lapsos de tiempo de un minuto. Para el depósito de las películas de cobre y oro, se empleó un equipo de evaporación de alto vacío Edwards 306 de 12 pulgadas de diámetro. Se utilizó una técnica de microinterferometría de haces múltiples para la medición de los espesores de las películas. Se empleó un sistema automatizado Metricon model 2010, cuyo principio de operación es el de la técnica de acoplamiento laser-guía de onda mediante un prisma de alto índice de refracción (prisma de rutilo; $n_p = 1.9648$). El Metricon se emplea para la caracterización de los modos de propagación, es decir, para la obtención de los índices de refracción efectivos de los modos TE y TM de las guías de onda fabricadas. Para la caracterización se utilizó luz con una longitud de onda de 632.8 nm.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN PARA GUÍAS DE ONDA MULTIMODALES

Las propiedades de una guía de onda plana de índice de gradiente son determinadas principalmente por su perfil del índice de refracción, es por ello que resulta de gran importancia la caracterización de dicho perfil. El perfil del índice de refracción (para los modos TE y TM) que presentan las guías de onda fabricadas, fue reconstruido mediante el uso de un sistema automatizado Metricon model 2010 cuyo principio de operación está basado en la técnica de acoplamiento laser-guía de onda mediante un prisma de alto índice de refracción; las componentes principales del equipo se muestran en la Fig. 2. El funcionamiento de éste se explica a continuación. Un haz láser choca con la base de un prisma de alto índice de refracción, dicho haz se refleja sobre un fotodetector. La guía de

TABLA I. Índices de refracción efectivos para los modos TE y TM (en $\lambda = 632.8$ nm) con sus respectivas profundidades para guías de onda con diferentes tiempos de difusión.

Tiempo de difusión (min.)	No. de modos	Orden modal, m	Índice de refracción efectivo, N_m		Profundidad modal (μm), x_m	
			TE	TM	TE	TM
30	3	-	1.5932	1.5951	superficie	superficie
		0	1.5774	1.5784	1.2254	1.2420
		1	1.5509	1.5510	1.7284	1.7561
		2	1.5180	1.5180	2.0177	2.0612
90	4	-	1.5756	1.5767	superficie	superficie
		0	1.5671	1.5677	1.7085	1.7283
		1	1.5538	1.5543	2.5150	2.5546
		2	1.5396	1.5401	3.1258	3.1714
		3	1.5260	1.5263	3.7635	3.7841
100	5	-	1.5724	1.5744	superficie	superficie
		0	1.5657	1.5665	1.8752	1.8334
		1	1.5538	1.5544	2.6520	2.6937
		2	1.5410	1.5417	3.3097	3.3444
		3	1.5288	1.5291	3.9466	3.9497
		4	1.5167	1.5172	4.4569	4.5607

onda a analizar llega a hacer contacto con la base del prisma por medio de una cabeza de acoplamiento. El ángulo de acoplamiento, θ , del haz laser (véase Fig. 2) puede variar por medio de una plataforma giratoria, en la cual están montados el prisma, la guía de onda, la cabeza de acoplamiento y el fotodetector. A ciertos valores de θ , llamados ángulos modales, los fotones violan el criterio de la reflexión total interna (dentro del prisma) y salen del prisma por un efecto de tunelaje óptico desde la base del prisma hasta entrar a la guía de onda. El haz de luz forma un ángulo ϕ con la normal, el cual determina la velocidad de fase ν_i del campo evanescente que se forma en la base del prisma. El acoplamiento eficiente de la luz dentro de la guía de onda ocurre solamente cuando escogemos al ángulo ϕ tal que ν_i es igual a la velocidad de fase, ν_m , de uno de los modos guiados de la guía de onda ($m = 0, 1, 2, \dots$). Bajo esta condición, el índice de refracción efectivo, N_m , del m -ésimo modo se relaciona con θ_m , de la siguiente manera [2]:

$$N_m = n_p \text{sen} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_m}{n_p} \right) + A \right], \quad (13)$$

donde A es el ángulo que se encuentra adyacente a la base del prisma y n_p es el índice de refracción del prisma. Una vez que se encuentran los modos de propagación, se utiliza el algoritmo desarrollado por Chiang [24], el cual toma los valores de los índices de refracción efectivos TE y TM para luego hacer una interpolación entre éstos, resultando así, un perfil del índice de refracción de la guía de onda analizada. Cabe mencionar que

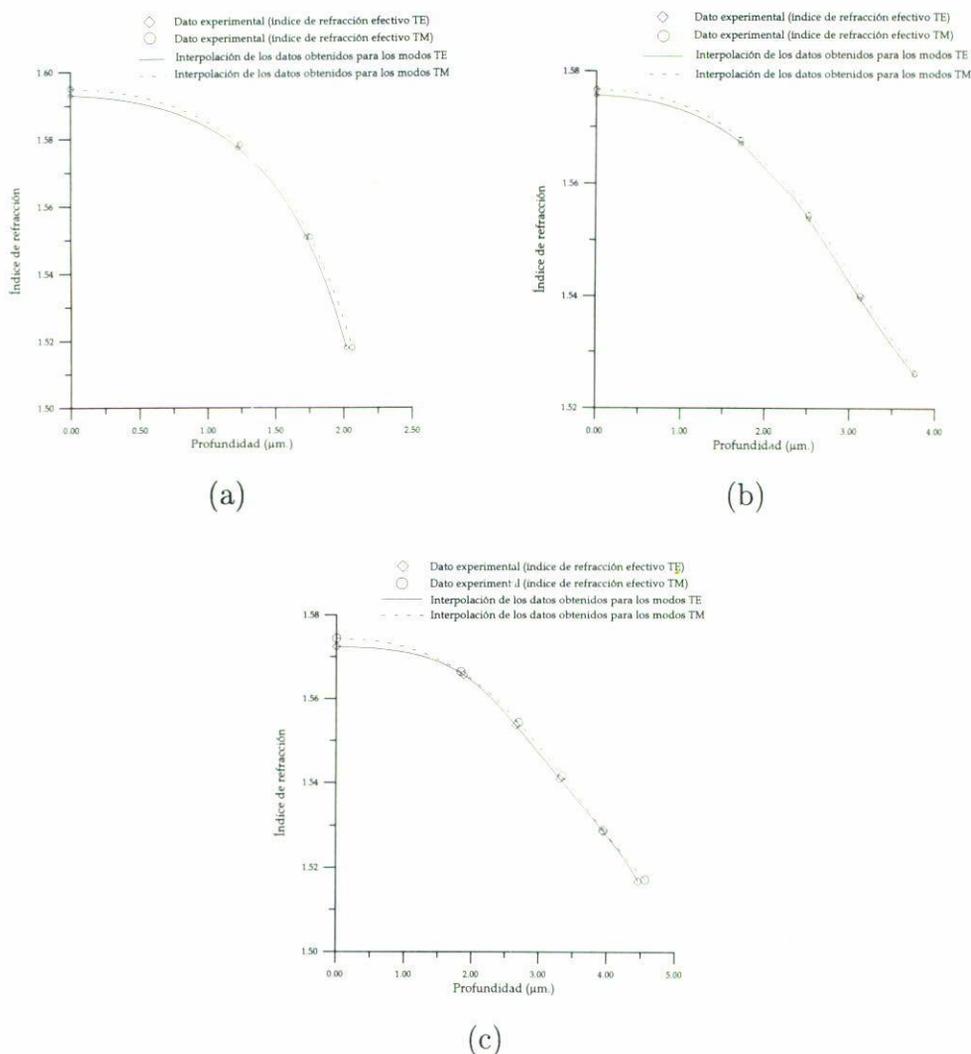


FIGURA 3. Reconstrucción de los perfiles del índice de refracción para las polarizaciones TE y TM, correspondientes a guías de onda con: (a) 3 modos, (b) 4 modos y (c) 5 modos. Se utilizó un algoritmo desarrollado por Chiang [24], el cual se basa en la interpolación de los índices de refracción efectivos.

el sistema automatizado Metricon necesita de un mínimo de tres modos para poder hacer este perfil. Entre más modos se obtengan, resultará mejor la estimación del perfil del índice. En la Tabla I se muestran algunos resultados de los índices de refracción efectivos para los modos TE y TM de algunas guías de onda multimodales.

Los perfiles del índice de refracción que se muestran en las Figs. 3a, 3b y 3c, corresponden a una interpolación de los valores de los índices de refracción efectivos (TE y TM) de la Tabla I. En las Figs. 3a, 3b y 3c, se aprecia que entre mayor profundidad tengan las guías de onda, éstas soportan mayor número de modos.

TABLA II. Birrefringencia modal que presentan las guías de onda de la Tabla I.

Tiempo de difusión (min.)	Orden modal, m	Birrefringencia modal ($\times 10^{-4}$), δn_m	Profundidad modal, (μm) x_m
30	-	19	superficie
	0	10	1.2337
	1	1	1.7422
	2	0	2.0394
90	-	11	superficie
	0	6	1.7184
	1	5	2.5348
	2	5	3.1486
	3	3	3.7738
100	-	20	superficie
	0	8	1.8543
	1	6	2.6728
	2	7	3.3270
	3	3	3.9481
	4	5	4.5088

4.2. PERFIL DE BIRREFRINGENCIA PARA GUÍAS DE ONDA MULTIMODALES

El perfil de birrefringencia puede ser reconstruido mediante la interpolación de los valores correspondientes a la birrefringencia modal, los cuales se pueden calcular empleando la siguiente expresión:

$$\delta n(x_m) = \delta n_m = N_m^{\text{TM}} - N_m^{\text{TE}}, \quad (14)$$

donde $N_m^{\text{TE}} [= n_t^{\text{TE}}(x_m)]$ y $N_m^{\text{TM}} [= n_t^{\text{TM}}(x_m)]$ son los índices de refracción efectivos para los modos TE y TM, respectivamente. Estos pueden ser medidos directamente del Metricon, en este caso, para los valores que se muestran en la Tabla I le corresponden los respectivos valores de la birrefringencia modal. Dichos valores se despliegan en la Tabla II. La interpolación de estos valores se representan en las Figs. 4a, 4b y 4c. Los perfiles de birrefringencia que se muestran en estas figuras indican que las guías de onda fabricadas presentan esfuerzos compresivos. Es decir, cuando $\delta n > 0$ se tienen esfuerzos en estado de compresión ($\sigma > 0$: hundimiento en la red vítrea) y cuando $\delta n < 0$ los esfuerzos están en tensión ($\sigma < 0$: levantamiento en la red vítrea).

La disminución de la birrefringencia en los perfiles de las Figs. 4a, 4b y 4c, es notable en todos los casos y probablemente se deba a una relajación variable de esfuerzos que se generan dentro del vidrio. Resultados similares fueron observados por Brandenburg [18]. Analizando las Figs. 4a, 4b y 4c, podemos observar que entre más profundas sean las

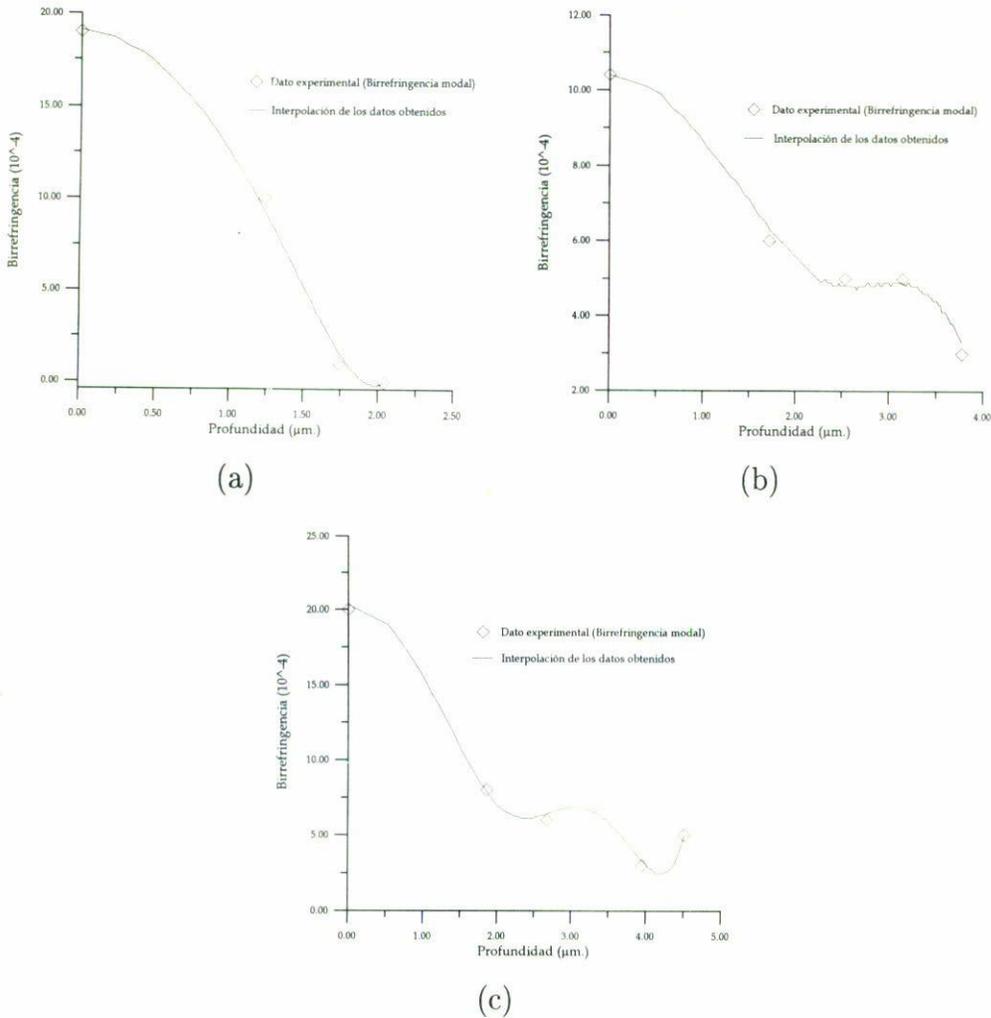


FIGURA 4. Reconstrucción del perfil de birrefringencia a partir de la interpolación de los valores de la birrefringencia modal, correspondientes a guías de onda con: (a) 3 modos, (b) 4 modos y (c) 5 modos.

guías de onda, mayor es la región de variación de la birrefringencia dentro de éstas. Quizá las variaciones se deban a una respuesta a los esfuerzos compresivos que se generan desde la superficie hacia dentro. En otras palabras, es una consecuencia de la distribución molecular no uniforme dentro de la red vítrea.

4.3. DISTRIBUCIONES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO Y DE LA BIRREFRINGENCIA MODAL PARA GUÍAS DE ONDA MONOMODALES

Se realizaron mediciones sobre guías de onda monomodales concernientes a la uniformidad modal a partir de la distribución de modos. Las mediciones de la distribución de modos de propagación de las guías de onda fabricadas, fueron realizadas en puntos sobre el

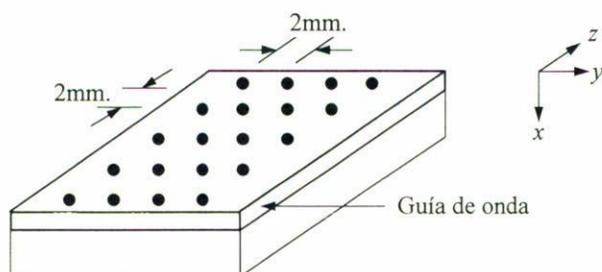


FIGURA 5. Distribución de regiones analizadas ópticamente a través de toda la superficie de una guía de onda monomodal fabricada.

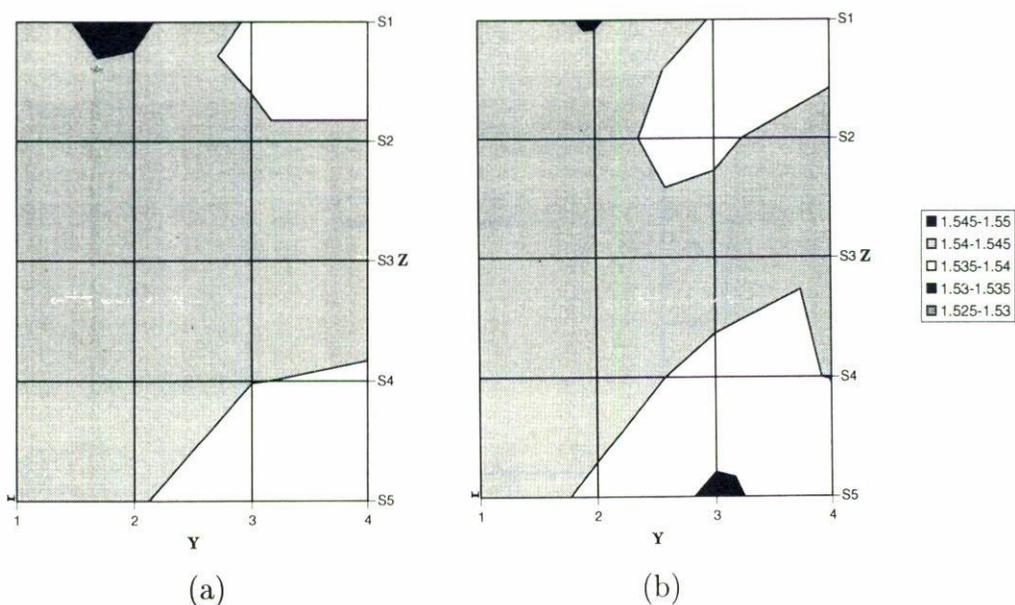


FIGURA 6. Distribución del índice de refracción efectivo ($m = 0$) para los modos: (a) TE y (b) TM, para una guía de onda monomodal.

vidrio con espaciamentos de 2 mm (véase Fig. 5). El análisis se hizo para verificar la uniformidad en los diferentes puntos sobre la superficie de la guía de onda, analizando como varía la distribución del índice de refracción efectivo de los modos TE y TM. En las Figs. 6a y 6b se muestran las distribuciones del índice de refracción efectivo para los modos TE y TM, respectivamente, para una guía de onda monomodal. Cada tono en las Figs. 6a y 6b representan un cierto rango de valores en el índice de refracción efectivo modal ($m = 0$), que en este caso corresponden a diferencias de 0.005 de índice. Estas figuras presentan una gran uniformidad en la parte central, y a través de estas distribuciones se estimó un valor promedio y una desviación estándar asociada de $N_0^{TE} = 1.541 \pm 0.003$ y $N_0^{TM} = 1.54 \pm 0.003$. Estas mediciones se llevaron a cabo con un láser de He-Ne en la longitud de onda de 632.8 nm.

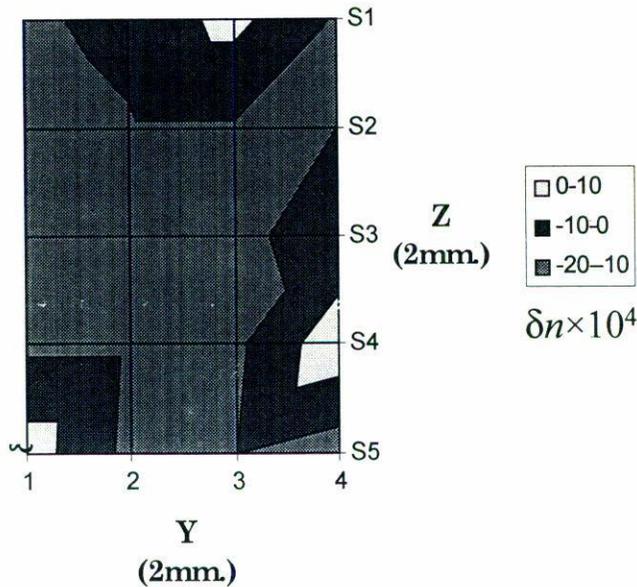


FIGURA 7. Distribución de la birrefringencia modal para $m = 0$, correspondiente a una guía de onda monomodal.

A partir de las distribuciones en el índice de refracción efectivo para los modos TE y TM (Figs. 6a y 6b), se obtuvo la distribución para la birrefringencia modal de la guía de onda monomodal ($m = 0$), la cual se muestra en la Fig. 7. De ésta distribución se estimó el valor promedio y una desviación estandar asociada de la birrefringencia modal para $m = 0$, esta fue de $\Delta n_0 = (-9 \pm 6) \times 10^{-4}$, la cual representan esfuerzos en estado de tensión (levantamiento en la red vítrea).

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de la birrefringencia modal de guías de onda obtenidas por medio de la difusión de iones de cobre en vidrio. El proceso de difusión se realizó a una temperatura de 350°C , asistido por un campo eléctrico de 30 volts/mm, con tiempos de difusión de 15 a 100 minutos. Utilizando la teoría de acoplamiento por prisma de alto índice de refracción se determinan los modos de propagación TE y TM que presentan las guías de onda. Se obtuvieron guías de onda con 1, 3, 4 y 5 modos utilizando tiempos de difusión de 15, 30, 90 y 100 minutos, respectivamente. Para la reconstrucción de los perfiles del índice de refracción y de birrefringencia, en las guías de onda multimodales, se empleo el método WKB inverso mediante la ayuda de un equipo automatizado Metricon. La guía de onda monomodal presentó un alto grado de uniformidad, a través de toda la superficie, en el valor del índice de refracción efectivo para los modos TE y TM (para $m = 0$). Estos valores son: $N_0^{\text{TE}} = 1.541 \pm 0.003$ y $N_0^{\text{TM}} = 1.54 \pm 0.003$. Para esta misma guía de onda, se observó una birrefringencia modal de $\delta n_0 = (-9 \pm 6) \times 10^{-4}$. Para las guías de onda con 3, 4 y 5 de propagación, se observó un cambio en el índice de

refracción máximo (en la superficie) de: $\Delta n_{\max}^{\text{TE}} = 7.93 \times 10^{-2}$ y $\Delta n_{\max}^{\text{TM}} = 8.12 \times 10^{-2}$; $\Delta n_{\max}^{\text{TE}} = 6.17 \times 10^{-2}$ y $\Delta n_{\max}^{\text{TM}} = 6.28 \times 10^{-2}$; $\Delta n_{\max}^{\text{TE}} = 5.85 \times 10^{-2}$ y $\Delta n_{\max}^{\text{TM}} = 6.05 \times 10^{-2}$, respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que este proceso de fabricación de guías de onda ópticas planares, es potencialmente utilizable para el desarrollo de circuitos de óptica integrada.

REFERENCIAS

1. G. Chartier, "Fabrication of Surface Optical Waveguides", en *Integrated Optics: Physics and Applications* edited by S. Martellucci and A.N. Chester, (Plenum Press, 1983).
2. S.I. Najafi, *Introduction to Glass Integrated Optics*, (Artech House, Inc. 1992).
3. T. Izawa and H. Nakagome, *Appl. Phys. Lett.* **21** (1972) 584.
4. D. Salazar, G. Paez, A. Villalobos, H. Marquez y J.Ma. Rincón, *Rev. Mex. Fís.* **41** (1995) 848.
5. R.V. Ramaswamy and R. Srivastava, *J. Lightwave Technol.* **6** (1988) 984.
6. K. Kobayashi, *Phys. Chem. Glasses* **20** (1979) 21.
7. S. Sakka, K. Kamiya, and K. Kato, *J. Non-Cryst. Solids* **52** (1982) 77.
8. S.S. Gevorgyan, *Elect. Lett.* **26** (1990) 38.
9. G. Battaglin, G. De Marchi, F. Gonella, A. Losacco, P. Mazzoldi, A. Miotello, A. Quaranta y A. Valentini, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio* **31-C3** (1992) 133.
10. H. Marquez, D. Salazar, E. Razón, and G. Paez, en *Gradient Index Optical Systems*, Vol. 12 of 1994 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1994) p. 27.
11. H. Marquez, D. Salazar, A. Villalobos, G. Paez and J.Ma. Rincón, *et al.*, *Appl. Opt.* **34** (1995) 5817.
12. S.D. Fantone, *Appl. Opt.* **22** (1983) 432.
13. M.L. Huggins and K.H. Sun, *Jour. Amer. Ceram. Soc.* **26** (1943) 4.
14. E.B. Shand, *Glass Engineering Handbook*, (McGraw-Hill, 1958).
15. K. Tsutsumi, H. Hirai, and Y. Yuba, *Elect. Lett.* **22** (1986) 1299.
16. J. Albert and G.L. Yip, *Elect. Lett.* **23** (1987) 737.
17. G.W. Morey, *The properties of Glass*, (The Guinn Company, 1950).
18. A. Brandenburg, *J. Lightwave Technol.* **LT-4** (1986) 1580.
19. A.N. Miliou, R. Srivastava and R.V. Ramaswamy, *Appl. Opt.* **30** (1991) 674.
20. J.W. Dally y W.F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, (McGraw-Hill, 1991).
21. I. Fanderlik, *Optical Properties of Glass*, (Elsevier Science, 1983).
22. T.H. Tomkinson and C.E. Saxer, en *Gradient Index Optical Systems*, Addendum and Post-deadline Papers (Optical Society of America, Washington, D.C., 1994) p. 1.
23. J.M. White and P.F. Heidrich, *Appl. Opt.* **15** (1976) 151.
24. K.S. Chiang, *J. Lightwave Technol.* **LT-3** (1985) 385.