

Guías de onda ópticas obtenidas a partir de la difusión de cobre en vidrio

D. SALAZAR, G. PÁEZ, A. VILLALOBOS. H. MÁRQUEZ

Departamento de Óptica

*Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México*

Y

J. MA. RINCÓN

*Departamento de Ciencias de los Materiales, I.C.C. E. Torroja CSIC
Serrano Galvache S/N, 28033, Madrid, España*

Recibido el 27 de enero de 1995; aceptado el 28 de junio de 1995

RESUMEN. Se fabricaron guías de onda ópticas mediante la difusión de cobre en sustratos de vidrio sódico-cálcicos. Para acelerar el proceso se aplicó un campo eléctrico externo. Se obtuvieron los perfiles de concentración de cobre en el vidrio con MEB (microscopía electrónica de barrido) con microsonda de rayos X y se determinaron las propiedades ópticas de las guías usando la técnica de acoplamiento por prisma.

ABSTRACT. Planar optical waveguides have been obtained by copper diffusion on glass substrates. External electric field was been employed to accelerate ion exchange process. Copper profiles in glass were obtained by SEM with X ray microprobe, and optical properties have been determined by prism coupling technique.

PACS: 42.82.Cr

1. INTRODUCCIÓN

La difusión de iones metálicos en sustratos de vidrio es una de las técnicas que se han usado en los últimos años para la elaboración de elementos pasivos de óptica integrada para comunicaciones ópticas [1-3]. Los sustratos 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 cuales se encuentran en porcentajes menores y determinan sus propiedades mecánicas y ópticas. Los iones modificadores en la red no están unidos fuertemente a los silicatos y además poseen una gran movilidad que depende de la temperatura (tiene un comportamiento tipo Arrhenius $\mu = \mu_0 \exp(-F/RT)$, donde μ es la movilidad, F 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 dos maneras de producir dichos movimientos iónicos en vidrios: agitación térmica y aplicación de una diferencia de potencial (o 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 produce un gradiente en el índice de refracción. Este cambio se debe a dos razones: la diferencia en la polarizabilidad por unidad de volumen y/o 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 gradientes en el índice de refracción consiste en difundir iones metálicos provenientes directamente de un sólido (películas delgadas). En ambos casos el proceso origina una dilatación de la red vítrea con la formación consiguiente de tensiones internas. En la última técnica, para aumentar la velocidad de difusión se puede aplicar un campo eléctrico externo.

Existen muchos trabajos que demuestran que en procesos de difusión en vidrios es el sodio el elemento que se desplaza [4-6]. La cinética del intercambio Cu-Na ha sido poco estudiada. Datos dispersos al respecto aparecen en la literatura [7-9] 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 consecuencias, 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. El cobre, al tener un radio iónico semejante al del sodio ($r_{\text{Na}^+} - r_{\text{Cu}^+} = 0.01 \text{ \AA}$), debe ocasionar menores tensiones que la plata ($r_{\text{Na}^+} - r_{\text{Ag}^+} = 0.3 \text{ \AA}$), elemento frecuentemente usado en óptica integrada.

En este trabajo se presentan los resultados de la fabricación de guías de onda ópticas obtenidas difundiendo iones de cobre sobre vidrio, así como su caracterización microanalítica y óptica.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se han fabricado guías de onda ópticas con la técnica de difusión asistida con un campo eléctrico externo de iones metálicos en vidrios. El perfil de los iones difundidos es función directa de las condiciones experimentales: la temperatura, el tiempo y el campo eléctrico externo. Estos parámetros determinan la profundidad y la concentración del cobre. De la composición química del vidrio también depende el resultado final, ya que no todos sus componentes poseen la misma movilidad, por lo que es importante seleccionar el sustrato adecuado [3]. En estos procesos generalmente el intercambio se da entre iones sodio con iones monovalentes [9]. Como fuente de iones se usó una película delgada de cobre y como sustrato un vidrio cuya composición química, en porcentaje en peso, es la siguiente: SiO₂ (72.08%), CaO (6.52%), Al₂O₃ (1.26%), MgO (3.86%), Na₂O (15.32%), K₂O (0.80 %), otros (0.2%). Para realizar el proceso de difusión se usó el arreglo que se muestra en la Fig. 1. El espesor de la película de cobre fue de aproximadamente 1 μm . Posteriormente, en

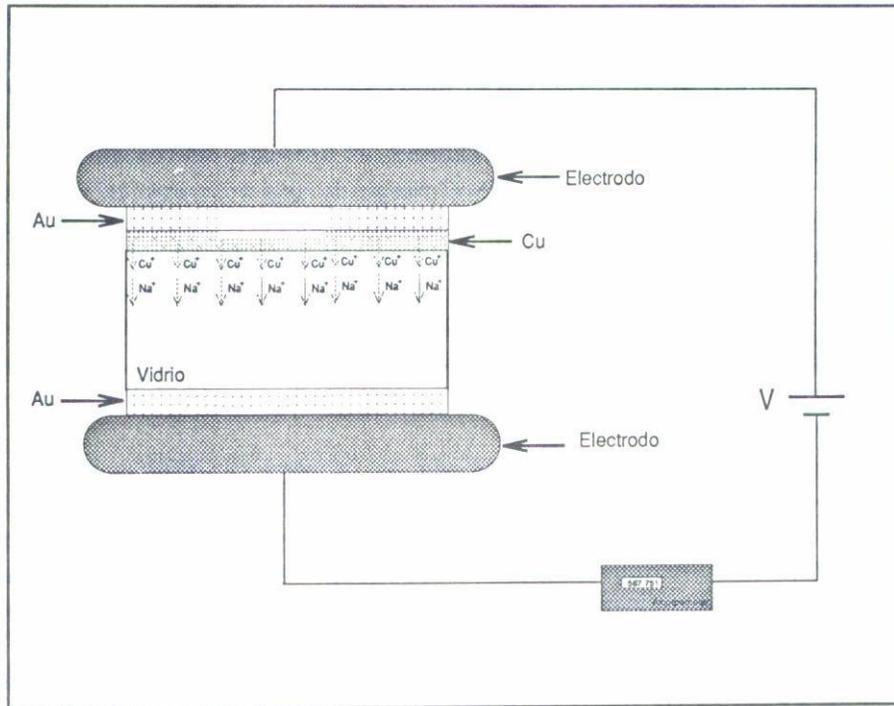


FIGURA 1. Esquema del proceso de difusión de Cu en vidrio.

ambas caras del vidrio se depositaron películas de oro. Éstas cumplen una doble función: mejorar el contacto eléctrico con los electrodos de acero a través de los cuales se aplicará posteriormente un campo eléctrico y, en el caso donde está la película de cobre, para protegerlo de la oxidación. Los depósitos de las películas se han realizado mediante la técnica de evaporación térmica en vacío. La difusión fue realizada a una temperatura de 350°C y un campo eléctrico de 30 V/mm con diversos tiempos de duración.

3. CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Una manera de verificar que la difusión de cobre hacia el interior del vidrio tiene lugar, es mediante la realización de un análisis de su composición química a través de microscopía electrónica de barrido MEB con microsonda de rayos X. Para esto se hicieron análisis en áreas promedio transversales de los sustratos y, después de pulirlas, se les depositó una película delgada de carbón para garantizar la conducción de electrones en la superficie de la muestra durante su observación y análisis por microscopía electrónica.

En la Fig. 2 se muestra la distribución de cobre en un vidrio que fue sometido al proceso de difusión. Se puede detectar la variación en la concentración del cobre y del sodio. El cobre disminuye su presencia en regiones que se alejan de la superficie y el sodio aumenta a medida que el cobre disminuye. Los datos pertenecen a una muestra cuyas condiciones fueron: temperatura de 350°C , campo eléctrico aplicado de 30 V/mm y tiempo de 20

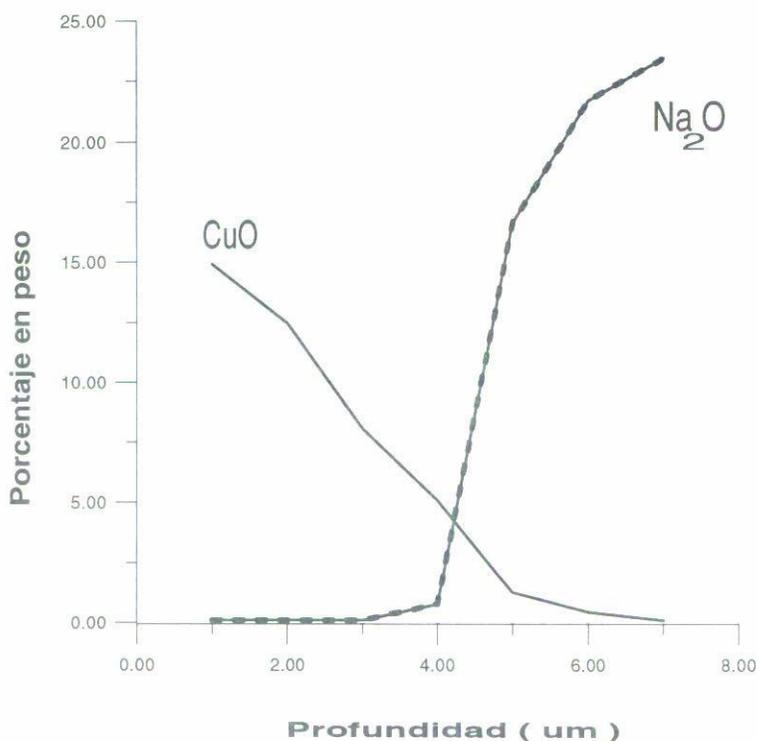


FIGURA 2. Distribución de Cu en el interior del vidrio después del proceso de difusión.

minutos. Las mediciones fueron tomadas en secciones rectangulares transversales de $1 \mu\text{m}$ de ancho.

4. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA

La técnica de acoplamiento mediante prisma de alto índice de refracción se utilizó para determinar el número de modos de propagación que puede aceptar una guía y, de ahí, el perfil del índice de refracción de la misma. La geometría del acoplamiento mediante prisma se ilustra en la Fig. 3. Así, una onda plana que incide a un ángulo θ viaja por el prisma y, en la base del mismo, forma un ángulo ϕ con la normal. Este ángulo determina la velocidad de fase en la dirección Z en la cuña de aire, V_i , que se forma entre el prisma y la guía de onda:

$$V_i = \frac{C}{n_p \cdot \text{sen } \phi}, \quad (1)$$

donde C es la velocidad de la luz en el espacio libre y n_p es el índice del prisma. Se produce un acoplamiento eficiente cuando seleccionamos el ángulo ϕ , de tal manera que V_i sea igual

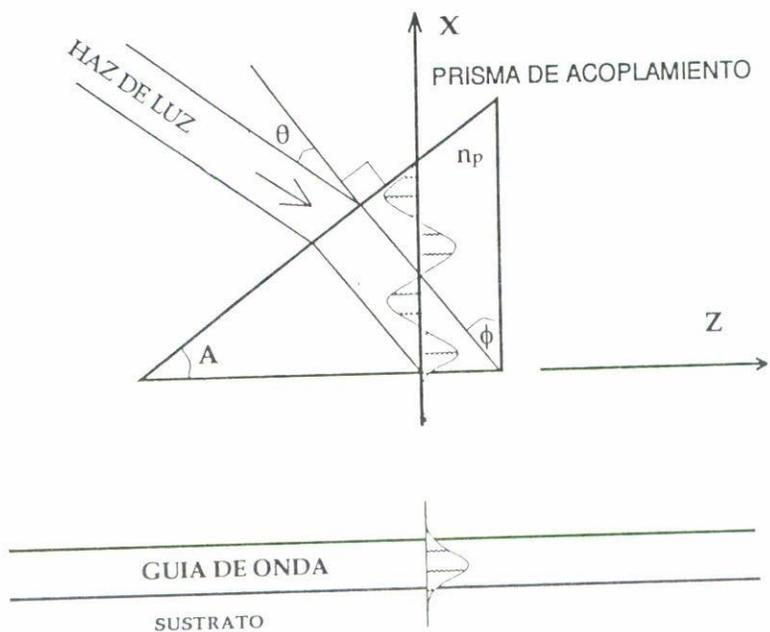


FIGURA 3. Geometría del acoplamiento mediante prisma de alto índice.

a la velocidad de fase V_m de uno de los modos de la guía de onda ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$):

$$V_m = \frac{C}{N_m}, \tag{2}$$

donde N_m es el índice de refracción efectivo del m -ésimo modo de propagación, y el cual está determinado por

$$N_m = n_p \text{sen } \phi_m, \tag{3}$$

donde ϕ_m es mayor que el ángulo crítico, por lo que se produce el fenómeno de reflexión interna total. Bajo esta condición, la superposición de la onda incidente y la onda totalmente reflejada produce una onda en la dirección X que decae exponencialmente. Este campo evanescente interactúa con el campo evanescente del modo guiado, produciendo un acoplamiento de la luz incidente.

En la ecuación anterior, ϕ_m no puede ser medido directamente, pero existe una relación entre ϕ_m y θ_m , que sí es directamente medible. Con lo anterior podemos calcular el índice efectivo N_m a partir de θ_m , por medio de la siguiente expresión [10]:

$$N_m = n_p \text{sen} \left(\text{sen}^{-1} \left(\frac{1}{n_p} \text{sen } \theta_m \right) + A \right), \tag{4}$$

donde A es el ángulo del prisma.

Mediante la técnica de acoplamiento con un prisma de alto índice se encontraron los índices efectivos, tanto para modos transversal eléctrico TE como transversal magnético

TABLA I. Índices efectivos (TE y TM) calculados a partir del acoplamiento por prisma.

Modos	orden	Índice (TE)	Índice (TM)	Profundidades (um)	
				en la superficie	
3	0	1.5804	1.5811	en la superficie	
		1.5682	1.5690	1.4527	1.4777
		1.5491	1.5498	2.0685	2.1061
4	1	1.5268	1.5270	2.4626	2.4845
		1.5907	1.5891	en la superficie	
		1.5787	1.5790	1.2626	1.6064
5	2	1.5627	1.5633	1.9734	2.3572
		1.5568	1.5562	2.4584	2.9397
		1.5287	1.5314	2.8214	3.5697
5	3	1.5724	1.5744	en la superficie	
		1.5657	1.5665	1.8752	1.8334
		1.5538	1.5544	2.6520	2.6937
		1.5410	1.5417	3.3097	3.3444
		1.5288	1.5291	3.9466	3.9497
5	4	1.5167	1.5172	4.4569	4.5607

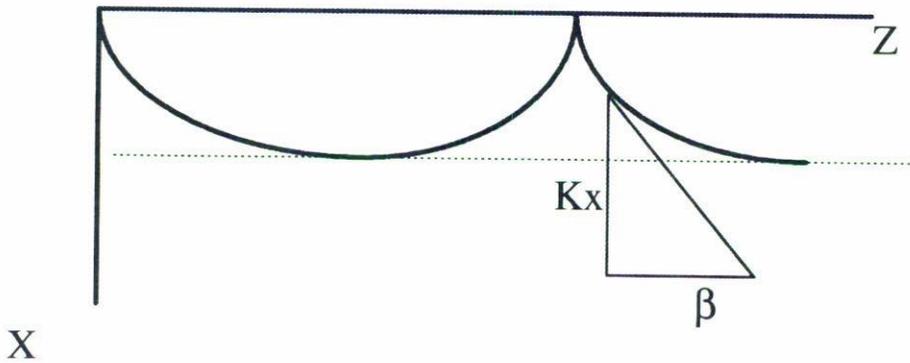


FIGURA 4. Trazo de rayos en un medio que presenta un gradiente en el índice de refracción.

TM, para guías que presentaron 3,4 y 5 modos. En la Tabla I se dan los resultados. Las mediciones se hicieron con luz láser ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) con polarizaciones TE y TM. El prisma utilizado tiene un índice de refracción de 1.9648 y el sustrato de vidrio tiene uno de 1.5119.

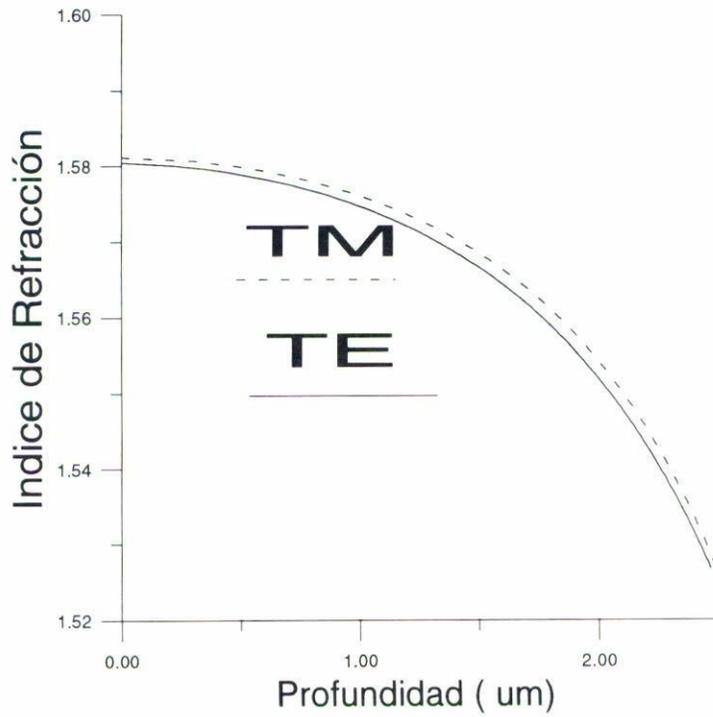


FIGURA 5. (a)

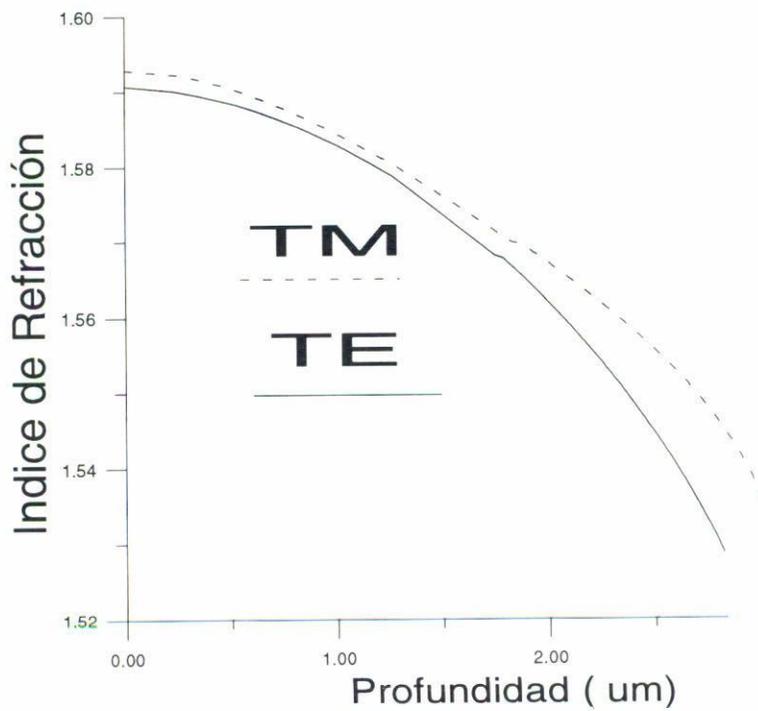


FIGURA 5. (b)

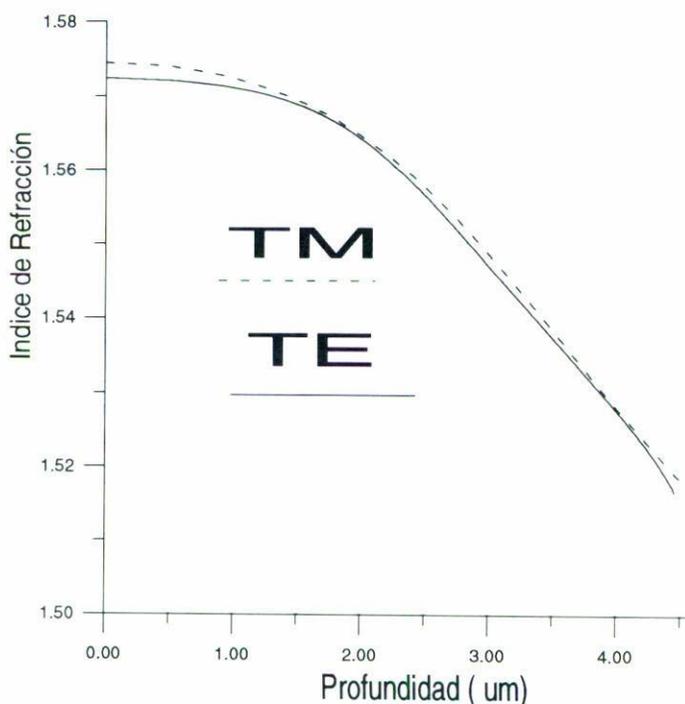


FIGURA 5. Perfiles del índice de refracción obtenidos para guías que presentan: a) 3 modos, b) 4 modos y c) 5 modos.

5. PERFILES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El método WKB (aproximación de Wentzel-Kramers-Brillouin que se aplica en mecánica cuántica) puede usarse para calcular las constantes de propagación en guías de onda que presentan un gradiente en el índice de refracción. La aplicación de este método se basa en el trazo de rayos que se muestra en la Fig 4. Los límites de la trayectoria de los rayos son los puntos donde se produce la reflexión total. La constante de propagación $\beta = K_0 n_{\text{efectivo}}$ es la componente Z del vector de onda y la componente en la dirección X es

$$K_x = K_0 (n^2(x) - n_{\text{efectivo}}^2)^{1/2}. \tag{5}$$

El corrimiento en fase total es

$$2K_0 \int_0^{x_a} \sqrt{n^2(x) - N^2(m)} dx = m\pi + \phi_a + \phi_s, \tag{6}$$

donde $n(x)$ es el perfil del índice de refracción y $N(m)$ es el índice efectivo del m -ésimo modo guiado ($m = 0, 1, 2, \dots$) y ϕ_a y ϕ_s son los cambios de fase en los puntos de retorno. 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.

Chiang [11] ha desarrollado el método WKB inverso, 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 datos de la Tabla I alimentan el cálculo de $n(x)$ y se realiza una interpolación mediante el método WKB inverso. En la Fig. 5 (a,b, y c) se muestran los perfiles para las guías de 3,4 y 5 modos.

6. CONCLUSIONES

Se ha hecho difusión de cobre en vidrio. Lo anterior se ha verificado por microscopía electrónica de barrido (MEB), técnica mediante la cual se puede apreciar el perfil de concentración de cobre para distintos tiempos de difusión. Igualmente se puede apreciar cómo el cobre ocupa el lugar del sodio, quien emigra hacia el interior del vidrio. De la caracterización modal se verifica que, como esperábamos, la birrefringencia es mínima y que se pueden fabricar guías insensibles a la polarización.

REFERENCIAS

1. T. Findakly, *Opt. Eng.* **24** (1985) 244.
2. R. Ludwing, *Glastech. Ber.* **62** (1989) 285.
3. S. Iraj Najafi, *Introduction to Glass Integrated Optics*, Artech House, Inc. (1992).
4. J.E. Gorty y D.G. Hall, *Opt. Lett.* **11** (1986) 100.
5. S. Honkanen y A. Tervonen, *J. Appl. Phys.* **63** (1988) 634.
6. S. Gevorgyan, *Electron. Lett.* **26** 38 (1990).
7. D. Gupta K., Vieregge y K.V. Snkrishan, *Appl. Phys. Lett.* **61** (18), 2 November (1992) 2178.
8. K. Kobayashi, *Phys. Chem. Glasses* **20, 21** (1979) 21.
9. J. White y P. Hiedrich, *Appl. Opt.* **23** (1984) 151.
10. K.S. Chiang, *J. Lighthwave Technol.*, LT-3 (1985) 385.