

Fabricación y caracterización de guías ópticas planas con perfil gradual de índice de refracción

Y. Berencén y O. Hidalgo

Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba; berencen@fisica.uh.cu

Recibido el 1/09/07. Aprobado en versión final el 15/1/08.

Sumario. Se desarrolla un sistema de fabricación de guías ópticas mediante el proceso de intercambio iónico y se obtienen guías de onda ópticas planas en función de los distintos parámetros de fabricación controlables en el proceso. Adicionalmente, se desarrolla una instalación experimental para la caracterización óptica de las guías, que permite realizar mediciones semi-automatizadas de los diferentes valores de las posiciones angulares de los modos de propagación. Se implementa una interfaz en Delphi 6.0 para el programa IWKB (Inverse Wentzel-Kramers-Brillouin) que permite determinar los perfiles de índice de refracción de las guías fabricadas. Como resultado de los procesamientos realizados se obtienen las cartas tecnológicas del proceso de fabricación, para los diferentes parámetros de las guías.

Abstract. An experimental setup for the fabrication of optical waveguides by means of ion exchange process is developed and the planar optical waveguides by the different controllable parameters in the fabrication process are obtained. Additionally, an experimental setup for the optics characterization of waveguides is developed, that allows accomplish semi-automated measurements of different angular position values of the propagation modes. An interface in Delphi 6.0 for the IWKB (Inverse Wentzel Kramers Brillouin) program is developed, that allows the determination of the refractive index profiles of waveguides fabricated. As result of the developed processings, the technological letters of fabrication process for the different parameters of waveguides are obtained.

Palabras clave. Guías ópticas 42.82.Et, intercambio iónico 82.39.Wj, acople por prisma 42.79.Gn.

1 Introducción

En los últimos años, un gran número de investigaciones han estado encaminadas a la fabricación y caracterización de guías de onda planas con perfil de índice de refracción gradual^{1,2,3,4}. Esto ha sido motivado, fundamentalmente, por el hecho de que estos dispositivos han mostrado poseer diversas aplicaciones en las ramas de las telecomunicaciones, la medicina y la industria^{5,6,7}; tal es el caso, de la construcción de lentes de GRIN, fotocopiadoras, endoscopios, entre otros.

Desde que en el año 1972 Izawa y Nakagome⁸ obtuvieron por primera vez, guías de onda con perfil de índice de refracción gradual, por migración de iones talio desde una mezcla fundida de sales, a través de un vidrio de borosilicato, el proceso de intercambio iónico ha sido ampliamente investigado y difundido^{8,9,10}. Actualmente, es-

te proceso se continua utilizando en la fabricación de guías de ondas, pero empleando otros materiales e iones, tales como Ag^+ y K^+ ^{1,11}. Esto se debe fundamentalmente a su sencillez, bajo costo y otras múltiples ventajas, que lo hacen aconsejable para la fabricación de dispositivos de la óptica integrada en condiciones específicas, respecto al resto de las técnicas existentes¹⁰.

Paralelamente a lo anterior, se desarrollaron técnicas de caracterización de guías de ondas, puesto que la gran mayoría de las aplicaciones de estos dispositivos, requieren, por lo general, del conocimiento de los índices efectivos y de la forma del perfil de índice de refracción, debido a que estos determinan, en buena medida, las propiedades ópticas de dichos dispositivos.

En el presente trabajo se reportan los resultados experimentales obtenidos, relacionados con los procesos de fabricación y caracterización de guías ópticas planas, con perfil de índice de refracción gradual y, se crean las ba-

ses, para en un futuro, desarrollar y estudiar dispositivos para la óptica integrada.

2 Aspectos teóricos

En el proceso de intercambio iónico en vidrio¹⁰, generalmente el Na^+ u otro ión de la estructura interna del vidrio, es reemplazado por otro presente en una mezcla de sales, con mayor tamaño y/o polarizabilidad como Ag^+ , K^+ , Cs^+ o Ti^+ . En consecuencia, el índice de refracción del sustrato (vidrio), crece localmente generando así una zona superficial de índice de refracción mayor y transparente a las ondas electromagnéticas, en el rango de las frecuencias ópticas. Esta zona constituye el núcleo de la guía.

En la mayoría de los casos el proceso es térmicamente espontáneo, sin embargo, también podría ser asistido aplicando un campo eléctrico a fin de acelerarlo o retardarlo. En general, este proceso genera guías de ondas con geometría plana y con un perfil de índice de refracción que varía en la coordenada transversal (profundidad)^{9,10}, según la función $n(x) = n_s + \Delta n f(x)$, donde n_s es el índice de refracción del sustrato, Δn es la diferencia entre el índice de refracción del sustrato y el índice de refracción de la cubierta (en nuestro caso es el aire) y $f(x)$ es una función que depende de la profundidad y que generalmente es de tipo gaussiano o función de error complementaria.

Si tomamos las ecuaciones de Maxwell, con las condiciones de simetría que presenta la estructura plana y consideramos un perfil de índice dependiente de x , obtenemos la ecuación de ondas (2.1) para dicha guía^{12,13,14}, para modos transversales eléctricos (TE). Esta es una ecuación diferencial en la cual sólo un conjunto discreto de M soluciones, de las infinitas posibles, se caracteriza por tener el campo eléctrico $E_m(x)$, confinado mayoritariamente en el núcleo, es decir, fuera del núcleo, su intensidad decae exponencialmente al alejarnos de las fronteras y constituye lo que se conoce como campo evanescente.

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + (k_0^2 n^2(x) - \beta_m^2) E_m(x) = 0 \quad (2.1)$$

Estas M soluciones para el campo electromagnético son los modos de propagación y a cada uno de ellos le corresponde un autovalor β_m (constante de propagación efectiva); sin embargo, por cuestiones prácticas se emplea un parámetro adimensional denominado índice efectivo (n^*), definido como $n^*_m = \beta_m / k_0$, donde k_0 es el vector de onda en el vacío.

El modelo de propagación por reflexiones múltiples, se aplica cuando existen varios modos de propagación; según este modelo, el rayo asociado a cada modo m se curva progresivamente hasta alcanzar una profundidad máxima llamada punto de retorno x_m y que viene definido según $n^*_m = n(x_m)$; aunque en la práctica existen dos puntos de retorno: uno en la superficie y otro en el interior de la guía, y la conexión de los campos en ambos puntos obliga al cumplimiento de la ecuación (2.2).

$$k_0 \int_0^{x_m} \sqrt{n(x)^2 - n_m^{*2}} dx = (m+3/4)\pi \quad ; m=0,1,\dots,M-1 \quad (2.2)$$

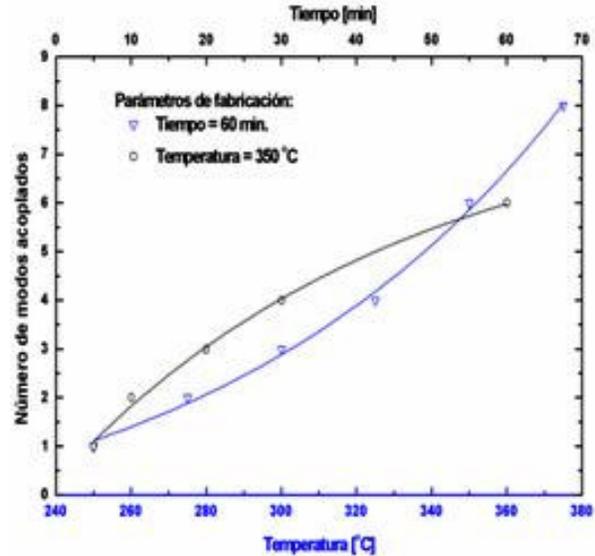


Figura 1. Dependencia del número de modos con el tiempo y la temperatura. (Las curvas continuas son sólo para orientación visual)

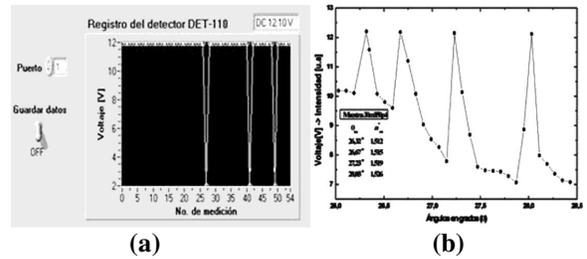


Figura 2. (a) Foto del controlador del multímetro digital Protek-506. (b) Intensidad de la luz colectada por el detector contra posición angular en grados para cada modo acoplado a la guía A5m350p4.

Si asumimos $n(x)$ como una función de m parámetros, y aplicamos el formalismo de WKB¹⁵ a una guía de ondas con M modos, podemos calcular los parámetros de dicha función, ajustando los índices efectivos medidos según la ecuación (2.2). Este procedimiento es conocido como “recuperación de perfiles de índice de refracción” o IWKB.

En el método de acople por prisma^{8,9,10,11} se usa un prisma específico, con un índice de refracción superior al del núcleo de la guía en estudio y de baja absorción para la longitud de onda de trabajo. Colocando el prisma en la superficie de la guía y utilizando el campo evanescente, pueden acoplarse a la guía algunos modos para ciertos ángulos de incidencia. Usando un ángulo sólido de incidencia, el patrón obtenido podrá ser medido fácilmente determinando las posiciones angulares de las líneas paralelas obtenidas, según el montaje experimental (líneas oscuras por la reflexión con un prisma, o líneas claras por la transmisión con dos prismas). La aplicación más frecuente de este método es en la determinación del número de modos guiados, los índices efectivos de pro-

pagación de cada modo y, en ocasiones, para la determinación del perfil del índice.

En las caracterizaciones mediante acople por prisma^{11,16,17,18}, se puede demostrar teóricamente que el ángulo de incidencia de la luz sobre la cara frontal del prisma (respecto de la normal), θ_m , para cada modo acoplado, está relacionado, según la Ley de Snell y principios básicos de geometría, con los índices efectivos de los modos de propagación, n_m^* , mediante la expresión (2.3), donde n_{prism} es el índice de refracción del prisma y θ_{prism} el ángulo base.

$$n_m^* = n_{prism} \cdot \sin \left[\theta_{prism} + \text{Arc} \sin \left(\frac{\sin[\theta_m]}{n_{prism}} \right) \right] \quad (2.3)$$

3 Resultados experimentales

3.1 Fabricación de las guías. Se fabricaron varias guías ópticas planas en vidrio tomándose, para el presente trabajo, un total de doce, divididas en dos grupos. Las muestras del primer grupo se obtuvieron fijando la temperatura en 350°C y variando el tiempo de intercambio en 1, 5, 10, 20, 30 y 60 min., mientras que en las del segundo grupo se fijó el tiempo en 60 min. y se varió la temperatura desde 250°C hasta 375°C en intervalos de 25°C.

El montaje experimental implementado para la fabricación de las guías, consta básicamente, de un horno en posición vertical, cuyo rango de temperaturas de trabajo está entre 0 °C y 600 °C, y en el interior del mismo se encuentra un tubo de ensayo de cuarzo que contiene la mezcla de sales. El horno es controlado por un controlador EuroTherm modelo 017-002-03-023-01, que brinda una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, con un termopar tipo k (Cromel&Alumel), conectado a un multímetro digital Fluke 45, que permite monitorear el proceso.

En la figura 1 (a) se muestra la carta tecnológica del proceso de fabricación de las guías, en nuestras condiciones experimentales. De la misma se puede observar cómo el número de modos acoplados para cada una de las guías fabricadas, aumenta en función de la temperatura y el tiempo de fabricación. Este resultado, es de esperarse, debido a que el intercambio iónico es un proceso de difusión y por tanto, la longitud de difusión de los iones plata o espesor de la zona de guiado, debe aumentar conforme aumente el tiempo y la temperatura, y por consiguiente, el número de modos que soporten las guías también. Por otra parte, de la propia figura 1 (a) se puede apreciar una tendencia a la saturación del número de modos para tiempos de intercambio iónico superiores a 60 min., a la temperatura de 350°C. Esto es debido a que en la superficie de la guía se crea una zona de acumulación de iones plata, que constituyen una barrera para los iones restantes que intentan difundir, y por tanto, no se consigue un cambio apreciable en la longitud de difusión o espesor de la zona de guiado.

3.2 Caracterización de las guías. Una vez fabricadas las guías, se procedió a la caracterización de estas

mediante el montaje experimental de acople por prisma similar al utilizado en¹¹. El mismo consta de tres bloques fundamentales: la fuente de luz láser de 632,8 nm y potencia menor de 1 mW, un sistema óptico expensor-concentrador, un porta-muestras diseñado y fabricado con fines multipropósito y un goniómetro, que permite determinar la posición angular de cada uno de los modos acoplados a la guía. Por otra parte, el mismo montaje, retirando el banco óptico y activando el sistema de detección, puede utilizarse para mediciones automatizadas^{11,16}. El sistema de detección implementado consta de un detector DET-110 colocado en el canto de la guía, un multímetro digital Protek-506 y un ordenador con puerto RS-232. Para la adquisición de los datos experimentales se desarrolló un controlador confeccionado en LabView 6.1 mostrado en la figura 2 (a). La figura 2 (b) muestra el gráfico característico de las mediciones semiautomáticas en el caso de la muestra 30m350p4, donde los picos de voltaje, para determinadas posiciones angulares, corresponden a cada modo acoplado en función del ángulo de incidencia, según (2.3).

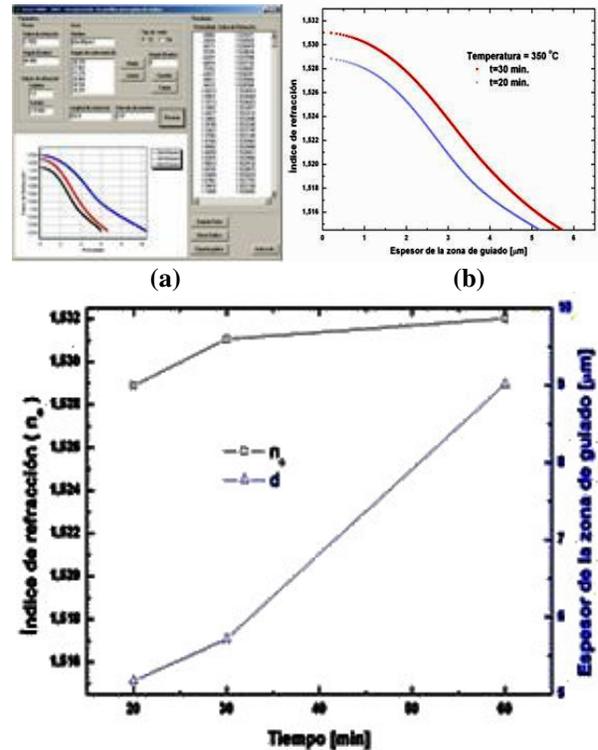


Figura 3. (a) Interfaz Windows del programa “Visual IWKB”. (b) Variación del índice de refracción de las guías con el espesor de la zona de guiado (perfiles de índice de refracción). (Ab); Dependencia de n_o y d con el tiempo de fabricación para muestras con $T=350^\circ\text{C}$.

3.3 Procesamiento por IWKB y resultados derivados. Se confeccionó en Delphi 6.0 la interfaz Windows “Visual-IWKB” (Figura 3(a)) para el programa IWKB 2,4], que calcula el perfil de índice de refracción a partir de los índices efectivos determinados por (2.3)

para cada guía fabricada. El mismo resuelve el problema inverso de la aproximación WKB de la mecánica cuántica, construyendo una función de índices de refracción, mediante interpolación de los índices efectivos medidos, que posteriormente se ajustan a la ecuación (2.2). Dicha interfaz permite la entrada y salida de datos con gran facilidad y la visualización de los resultados del procesamiento, como el índice de refracción superficial y espesor de las zonas de guiado.

A modo de ejemplo, mostramos en la figura 3(b) los perfiles de índice de refracción de las guías A20m350p4 y A30m350p4 determinados mediante el procesamiento por IWKB. Puede apreciarse que dichos perfiles cumplen con la función $n(x) = n_s + \Delta n f(x)$, típica de un proceso de intercambio iónico y que cualitativamente tienen forma de función gaussiana o función error complementaria.

Por último, como resultado del procesamiento de los perfiles de índice de refracción obtenidos para el conjunto de guías fabricadas, se muestra en la figura 3(c) el aumento del espesor de la zona de guiado y del índice de refracción superficial de las guías, con el tiempo de fabricación, para una misma temperatura de intercambio iónico. Esta figura además, constituye una carta tecnológica para los parámetros n_o y d .

4 Conclusiones

- El proceso de intercambio iónico realizado en nuestras condiciones experimentales, permite obtener de manera controlable, guías de onda con parámetros de propagación adecuados en un amplio rango de tiempos de difusión.
- La instalación experimental para realizar mediciones semi-automáticas es factible para la caracterización de los parámetros ópticos de las guías, específicamente, la determinación de las posiciones angulares de los modos de propagación y a partir de estos los índices efectivos.
- La implementación de la interfaz del programa IWKB permite obtener los perfiles de índice de refracción y los espesores de la zona de guiado para las guías fabricadas.
- Las guías fabricadas presentan perfiles de índice de refracción gradual y tienen la forma $n(x) = n_s + \Delta n f(x)$.
- Se obtuvieron las cartas tecnológicas para los parámetros fundamentales de las guías, a saber, número

de modos, índice de refracción superficial y espesor de la zona de guiado.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor José A. Rodríguez por la crítica revisión del manuscrito y las fructíferas discusiones en torno al tema.

Referencias

1. J. Liñares, A. A. Lipovskii, D. K. Tagantsev, and J. Turunen, *Optical Materials*. 14, 115 (2000)
2. F. Horowitz, M. B. Pereira, S. Pelli, and G. C. Righini, *Thin Solid Films*. 460, 206 (2004)
3. S. Sebastiani, S. Berneschi, M. Brenci, G. Nunzi Conti, S. Pelli, and G. C. Righini, *Optical Engineering*. 44(5), 054602 (2005)
4. M. Monir, H. El-Refaei, and D. Khalil, *Fiber and Integrated Optics*. 25, 69 (2006)
5. C. Florea and K. A. Winick, *Journal of Lightwave Technology*. 21, 246 (2003)
6. D. Cullemann, A. Knuettel and E. Voges, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 6, 730 (2000)
7. J. R. Salgueiro, V. Moreno, and J. Liñares, *SPIE: Integrated Optics Devices IV*. 3936, 164 (2000).
8. T. Izawa, and H. Nakagome, *Applied Physics Letter*, 21, 584 (1972)
9. S. I Najafi, *Introduction to glass Integrated Optics*, (Artech House, London, 1992)
10. R. Ramaswamy et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 24, 780 (1988).
11. O. Hidalgo, and Y. Berencén, *phys. stat. sol. (c)* 10, 3746 (2005).
12. R. G. Hunsperger, *Integrated optics: theory and technology*, (Academic Press, 1974)
13. Marcuse. *Theory of dielectric optical waveguides*, (Academic Press Inc., 1974)
14. T. Tamir, *Guided-Wave Optoelectronics*, 2nd Ed, (Springer-Verlag, 1990)
15. K. S. Chiang, *Journal of Lightwave Technology*. 3, 385 (1985)
16. O. Hidalgo, Phd thesis, Science Materials Department, University of Oviedo, (2003).
17. P. K. Tien, and R. Ulrich, *Journal of Optical Society of Americam*. 60, 1325 (1970).
18. R. Ulrich, and R. Torge, *Applied Optics*. 12, 2901 (1973).