

Análisis de Guías de Onda Fabricadas Mediante Implantación Iónica en Nd:YAG y Nd:YVO₄

Gloria V. Vázquez García^a, María Eugenia Sánchez Morales^a, Erick Flores Romero^b y Heriberto Márquez Becerra^b

^a Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Lomas del Campestre, 37150 León, Gto., México

^b Departamento de Óptica, CICESE, km 107 Carr. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., 22860, México
gvvazquez@cio.mx, msanchez@cio.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la formación de guías de onda ópticas fabricadas en Nd:YAG y Nd:YVO₄ mediante implantación de protones o iones de carbono. Se midieron los modos de propagación y se obtuvieron los perfiles de índice de refracción correspondientes. En particular, para los cristales de YVO₄, la implantación de carbono produjo un incremento de índice en la región de la guía el cual es característico de guías fabricadas mediante métodos convencionales. Más aún, se logró oscilación láser a 1064 nm en las guías de Nd:YAG con un umbral de oscilación desde 11 mW y eficiencia de ~ 8 %.

INTRODUCCIÓN

Las guías de onda son uno de los fundamentos del campo de alta tecnología relacionado con el área de óptica integrada tal como procesamiento de señales de comunicación óptica y óptica computacional; en particular, la propagación de la luz puede ser confinada en un espacio angosto logrando amplificación y oscilación láser. El estudio de implantación de protones se ha hecho para diferentes cristales [1] pero recientemente la implantación de iones pesados se ha analizado con gran interés pues usualmente requiere de menor dosis que los iones ligeros como es el caso de hidrógeno y helio [2-4].

Hasta la fecha la implantación iónica para producir guías de onda se ha demostrado en más de 50 materiales [5]. El daño producido por colisiones nucleares durante la implantación provoca una reducción de la densidad física del cristal, lo que produce una reducción del índice de refracción. Así, el pico de radiación nuclear que se produce al final de la trayectoria del ión (e.g. 1 MeV He⁺) produce generalmente una “barrera óptica” de menor índice que el del sustrato [6]. La región entre esta barrera y la superficie es entonces rodeada de regiones con menor índice de refracción y puede actuar como una guía de onda.

La altura de la barrera óptica puede controlarse por la dosis del ión y el espesor de la guía es controlado por la energía del mismo. Para los iones mono-energéticos la anchura de la barrera varía con el material del sustrato, dependiendo de la estabilidad de los defectos estructurales. Pueden usarse más implantaciones sobre el mismo cristal con energía múltiple para ensanchar la barrera óptica y mejorar el confinamiento en la guía.

En este trabajo se presenta la caracterización de guías formadas mediante implantación de protones o carbono en cristales de Nd:YAG y Nd:YVO₄. Dicha caracterización incluye la obtención de modos de propagación, perfiles de índice de refracción, propiedades espectroscópicas y en particular las características de emisión láser para las guías de YAG.

MÉTODO EXPERIMENTAL

En el acelerador Peletrón *9SDH-2* del Instituto de Física de la UNAM se realizó la implantación de iones para la formación de guías de onda planas. La tabla 1 nos indica los parámetros de cada implantación. La muestra 3 fue implantada a diferentes energías para producir una barrera óptica amplia y así reducir las pérdidas por tunelaje.

La obtención de los modos de propagación fue a través del *Metricon Modelo 2010* del laboratorio de Películas Delgadas del CICESE. Una vez obtenidos los modos de los índices de refracción, se calculó el perfil de índice de cada guía a través del método de aproximación de multicapas basado en el método de reflectividad [7].

Tabla 1. Parámetros usados en la implantación de los cristales de Nd:YVO₄.

Muestra	Cristal	Iones	Dosis [iones/cm ²]	Energía [MeV]	Ángulo
1	YVO ₄	C ²⁺	2x10 ¹⁵	7.0	0°
2	YVO ₄	H ⁺	1.76x10 ¹⁶	1.0	60°
3	YAG	H ⁺	6X10 ¹⁶	1.25,1.15,1.1 y 1	0°
4	YAG	C ²⁺	1X10 ¹⁶	7	0°

Se realizó el análisis espectroscópico utilizando un diodo láser (*Spectral Diode Labs* modelo SDL-2432-H1) que emite alrededor de 812 nm a una potencia de 500 mW para excitar el cristal (tanto la guía de onda como el sustrato) y para la obtención de los espectros de emisión se usó un espectrómetro *ANDO AQ-6312B*. El montaje utilizado es el de acoplamiento de canto, el cual utiliza un objetivo de microscopio (40x ó 20x) para enfocar la guía a la entrada y a la salida otro objetivo de microscopio (20x ó 10x) para recuperar el haz, la luz que incide sobre el primer objetivo está polarizada (para el caso de Nd:YVO₄). La muestra está montada horizontalmente en un mesa ajustable con movimientos en *y* y *z* que ayudan a ver diferentes partes de la guía.

Para lograr el efecto láser en el cristal Nd:YAG se utilizó como bombeo un láser sintonizable de Ti:Zafiro con un rango de longitud de onda de 750-850 nm y la cavidad láser fue formada empalmando espejos en los cantos pulidos del cristal. Un espejo con reflectividad >99% a 1064 nm y transmisión del 98% a 815 nm fue colocado en la cara frontal mientras que en la salida se utilizó un acoplador con 97% de reflectividad a 1064 nm y >99.8% a 815 nm. La potencia de bombeo así como la señal láser a la salida de la guía fueron obtenidas con un medidor de potencia *Spectra Physics* Modelo 407A y un fotodiodo de germanio respectivamente.

Cuando se forman guías por implantación iónica se generan centros de color, esto implica pérdidas de absorción en la guía, por lo que se requiere un tratamiento térmico para reducir dichas pérdidas [5]. En el caso del Nd:YAG se utilizó un horno operando a una temperatura de 400 °C durante 30 minutos y para Nd:YVO₄ a 250°C durante 30 minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se comparan los perfiles de índice y modos **TE** del índice ordinario y extraordinario de la muestra 1, la forma de presentar los datos del perfil de índice de refracción, donde el índice se incrementa hacia abajo se hace para resaltar la presencia de la barrera óptica generada. Los modos están graficados con respecto a la segunda abcisa que indica el número de modo. Aquí se observa que la profundidad de la barrera del perfil es la misma, teniendo una altura similar alrededor de 1.98, también con un índice de la superficie equivalente (~ 2.09). Respecto al valor de los modos existe una variación para los primeros cuatro modos de alrededor de 0.01%, para los siguientes pares de modos la variación se va incrementando hasta llegar en el último par de modos de 0.6%. Estos resultados, donde los modos ordinarios y extraordinarios son muy similares, concuerdan con [8] en donde se hace un análisis de guías de onda en LiNbO₃ el cual también es un cristal birrefringente; se reporta un comportamiento similar con implantaciones de *Si* en Nd:YVO₄ [3].

El perfil obtenido a partir de la medición de modos para la muestra 4 se muestra en la figura 2 donde puede verse que la reducción de índice fue considerable (2.5%) y se localiza a una profundidad de ~ 4 μm. Las guías implantadas con protones (muestra 2 y 3) presentan un perfil típico de barrera óptica donde la disminución del índice de refracción fue menor al 1%.

Para la muestra 2 implantada con protones con una dosis de 1.76×10^{16} a un ángulo de 60° , el espectro de emisión en el rango de [1049,1099] nm se observa en la figura 3, donde tenemos que el ancho de banda de la guía en el pico de 1064 nm es similar al del sustrato. Para el pico alrededor de 1074 nm el ancho de banda es el mismo pero para el pico alrededor de 1089 nm la intensidad de la guía es un poco menor que la del sustrato. La guía de YVO_4 implantada con carbono (muestra 1) mostró cierto ensanchamiento espectral en comparación con el cristal en volumen, el cual fue provocado por el daño causado al implantar iones pesados. Sin embargo, las líneas de emisión de la guía no presentaron desfaseamiento con respecto a las del sustrato.

La caracterización espectroscópica reportada previamente para los cristales de Nd:YAG estudiados [1,2] demuestra que la luminiscencia de las guías coincide con la luminiscencia del Nd:YAG en volumen, además de que presentan un tiempo de vida con un valor de 240 μs similar al reportado en este cristal. La figura 4 muestra las curvas de emisión tanto de la guía como del volumen para la muestra 3, lo cual confirma que las propiedades espectroscópicas del cristal son preservadas en la guía.

Observando las figuras 3 y 4 se puede concluir que la luminiscencia del Nd en YVO_4 y YAG es diferente, pues depende del material huésped y no del dopante. Así también que la implantación iónica no afecta significativamente el espectro de emisión de la guía.

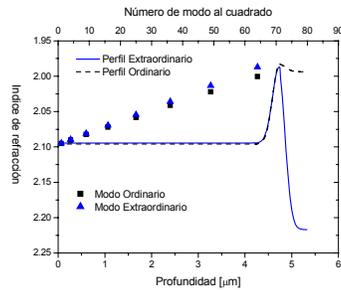


Fig. 1. Comparación de los perfiles de índice ordinario y extraordinario y modos TE del índice ordinario de Nd:YVO₄ implantado con carbono a una dosis de 2.0×10^{15}

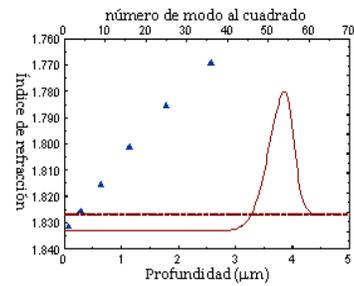


Fig. 2. Modos y perfil de índice de refracción para Nd:YAG implantado con carbono a una energía de 7 MeV y a una dosis de 1×10^{16} iones/cm²

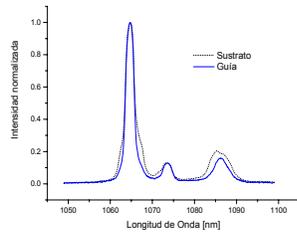


Fig. 3. Espectro de emisión del Nd:YVO₄ implantado con protones con una dosis de 1.76×10^{16} iones/cm², en el rango de [1049,1099] nm.

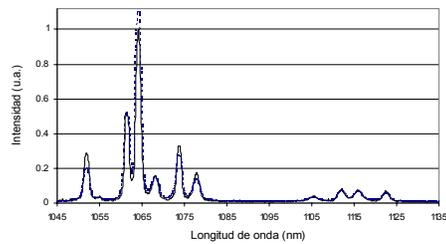


Fig. 4. Espectros de emisión de Nd³⁺ en YAG alrededor de 1064 nm para la guía (línea punteada) y el volumen (línea continua)

Para el espectro de emisión láser de la muestra 3 se obtuvo un umbral láser de 11 mW y una eficiencia de 7 %. La longitud de onda de emisión es 1064.3 nm con un ancho de banda (FWHM) de 0.14 nm. Con respecto a la muestra 4 implantada con iones de carbono, se obtuvo un umbral láser de 22 mW y una eficiencia de 9 % [9,10], el pico de emisión láser se localizó en 1064.3 nm con un ancho de banda de ~ 0.2 nm. Al comparar ambas guías de Nd:YAG, la muestra 4 que fue implantada con carbono presenta mayores pérdidas de propagación, por lo que el umbral de oscilación correspondiente es mayor.

CONCLUSIONES

La implantación de iones de C^{2+} en $Nd:YVO_4$ aumenta el índice ordinario en la región de la guía, mientras que el índice extraordinario adquiere valores menores respecto al sustrato. En el caso de YAG se genera una reducción considerable de índice al final de la trayectoria de los iones. En cuanto a la implantación de protones, se observa la formación típica de una barrera óptica en ambos materiales.

El análisis espectroscópico indica que las propiedades ópticas de los iones de neodimio se mantienen en la estructura de la guía después del proceso de implantación. Las señales de emisión láser muestran alta estabilidad operando en el régimen de modo continuo a temperatura ambiente, confirmando las excelentes propiedades térmicas, mecánicas y ópticas del $Nd:YAG$ como sistema láser en configuración de guía de onda óptica.

REFERENCIAS

- [1] G. V. Vázquez, et al., *Optics Communications*; 218, 141-146, (2003).
- [2] G. V. Vázquez, et al., *Opt. Express*; 11 (2003) 1291.
- [3] F. Chen, et al., *Optics Letters*; Vol. 27 No. 13, 1111-1113 (2002).
- [4] F. Chen, et al., *Applied Physics*; Vol. 80 No. 19, 3473-3475 (2002).
- [5] P. D. Townsend, P.J. Chandler y L. Zhang; "*Optical Effects of Ion Implantation*"; Cambridge University Press (1994).
- [6] P. D. Townsend, *Inst. of Physics, Conf. Series*. 28 Ch. 3 (1976)
- [7] P. J. Chandler y F. L. Lama., *Opt. Acta*; Vol. 33, 127 (1986).
- [8] J. Rams, et al., *Journal of Applied Physics*; Vol. 87 No. 7, 3199-3202 (2000).
- [9] M. Domenech, E. Cantelar, G. V. Vázquez y G. Lifante, *Proc. 11th ECIO*, 205-208 (2003)
- [10] M. Domenech, G. V. Vázquez et al., *Appl. Phys. Lett.* Vol 83 No. 20 4110-4112 (2003)