

Design, fabrication and characterization of a three dimensions power splitter in written waveguides in Lithium Niobate by fs laser

Diseño, fabricación y caracterización de un divisor de potencia tridimensional en guías de onda escritas en Niobato de Litio con láser de fs

V. Guarepi^{1,2}, R. Peyton;^{1,2} y G.A. Torchia^{1,3}

1. Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET-CICBA-UNLP), Camino Centenario y 506, s/n, M.B. Gonnet (1897), Pcia, Buenos Aires, Argentina

2. Universidad Nacional Arturo Jauretche, Av. Calchaquí 6200, Florencio Varela, Pcia Buenos Aires, Argentina

3. Universidad Nacional de Quilmes, Roque Saenz Peña 352, Quilmes, Pcia de Buenos Aires, Argentina

(*) E-mail: gustavot@ciop.unlp.edu.ar

Received: 16/12/2022

Accepted: 02/05/2023

DOI: 10.7149/OPA.56.2.51125

ABSTRACT: In this work we present a beam splitter micromachined in three dimensions (3D) with type II waveguide structures made in a Lithium Niobate crystal by using femtosecond laser writing technique. Photonic circuits with this functionality have not been reported using type II waveguides. In addition, in this work we show the main characteristics of these 3D optical circuits from coupling laser light in the designs. In particular, we analyse the relationship of the input/output signals in the 1x4 format, for each of the branches of the splitter. We also test the output/input signals in a 4x1 configuration of each manufactured device. Currently, laser writing occupies a predominant place in the development of prototypes of different integrated photonic elements for several applications. The implementation of the designed systems using three-dimensional architectures will allow greater integration and multiplexing of different sensors based on integrated photonics within the same device.

Key words: power splitter, 3D integrated photonics, Lithium Niobate

RESUMEN: En este trabajo presentamos un divisor de haz micro-mecanizado en tres dimensiones (3D) con estructuras de guías de onda tipo II, en un cristal de Niobato de Litio utilizando escritura con láser de femtosegundos. No han sido reportados circuitos fotónicos con esta funcionalidad utilizando guías de onda Tipo II. Además, en este trabajo mostramos las principales características de estos circuitos ópticos 3D a partir del acople de luz láser en los diseños. En particular analizamos la relación de las señales de entrada/salida en el formato 1x4, para cada una de las ramas del divisor. Asimismo, testeamos las señales (salida/entrada) en configuración 4x1 de cada dispositivo fabricado, al utilizarlo como combinador. Actualmente la escritura láser ocupa un lugar predominante en el desarrollo de prototipos de distintos elementos y dispositivos fotónicos integrados para variadas aplicaciones. La implementación de sistemas diseñados mediante arquitecturas tridimensionales permitirá una mayor integración y multiplexación de distintos sensores basados en fotónica integrada dentro de un mismo dispositivo.

Palabras clave: divisor de potencia, fotónica integrada en 3D, Niobato de Litio

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] G. Marowsky *Planar Waveguides and other Confined Geometries: Theory, Technology, Production, and Novel Applications*, Berlin: Springer, (2014).
- [2] G. Lifante Pedrola, *Beam propagation method for design of optical waveguide devices*. John Wiley & Sons (2015).
- [3] L. Chrostowski, & M. Hochberg, *Silicon photonics design: from devices to systems*. Cambridge University Press (2015).
- [4] L. Arizmendi, "Photonic applications of lithium niobate crystals", *physica status solidi (a)*, 201(2), 253-283 (2004).
- [5] R. Osellame, G. Cerullo, & R. Ramponi, (Eds.), *Femtosecond laser micromachining: photonic and microfluidic devices in transparent materials*, Berlin: Springer (2012).
- [6] F. Chen, and J. R. V. de Aldana, "Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining", *Laser & Photonics Reviews* (2014).
- [7] D. A. Presti, V. Guarepi, F. Videla, A. Fasciszewski and G. A. Torchia "Intensity modulator fabricated in LiNbO₃ by femtosecond laser writing" *Optics and Lasers in Engineering* (2018)
- [8] E. Kifle, P. Loiko, C. Romero, J.R.V. De Aldana, Ródenas, A., Zakharov, V., ... & Mateos, X., "Femtosecond-laser-written Ho: KGd (WO₄)₂ waveguide laser at 2.1 μm". *Optics letters*, 44(7), 1738-1741, (2019).
- [9] M. Ams, P. Dekker, S. Gross and M. Withford, "Fabricating waveguide Bragg gratings (WBGs) in bulk materials using ultrashort laser pulses" *Nanophotonics*, 6, (5),743-763, (2017).
- [10] G. A. Torchia, C. Méndez, D. Delgado, J. R. A. Vázquez, I. Arias, & L. Roso, "Diffraction gratings written inside/on Lithium Niobate by means of femtosecond laser pulses. In *Integrated Optics*", *Silicon Photonics, and Photonic Integrated Circuits* (Vol. 6183, pp. 463-470). SPIE, (2006).
- [11] S. Nolte, M. Will, J. Burghoff, A. Tuennermann, "Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics" *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 77(1), 109-111. doi:10.1007/s00339-003-2088-6, (2003).
- [12] W. Sohler, H. Hu, R. Ricken, V. Quiring, C. Vannahme, H. Herrmann, Y. Min, "Integrated Optical Devices in Lithium Niobate". *Optics & Photonics News*, 19(1), 24. (2008).
- [13] C. Florea, K. A. Winick, "Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses" *Journal of Lightwave Technology*, 21(1), 246-253 (2003).
- [14] S. Kroesen, W. Horn, J. Imbrock, and C. Denz, "Electro-optical tunable waveguide embedded multiscan Bragg gratings in lithium niobate by direct femtosecond laser writing," *Optics Express*, vol. 22, no. 19, p. 23339 (2014).
- [15] C. Gutiérrez-Martínez, J. Santos-Aguilar, "Electric Field Sensing Scheme Based on Matched LiNbO₃ Electro-Optic Retarders" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(7), 1362-1368, (2008).
- [16] J. L. Cruz, Y. O. Barmenkov, A. Díez, M. V. Andrés, "Measurement of phase and group refractive indices and dispersion of thermo-optic and strain-optic coefficients of optical fibers using weak fiber Bragg gratings". *Applied Optics*, 60(10), 2824-2832, (2021).
- [17] G. J. Ajates, J. R. V. de Aldana, F. Chen, and A. Ródenas, "Three-dimensional beam-splitting transitions and numerical modelling of direct-laser-written near-infrared LiNbO₃ cladding waveguides" *Opt. Mater. Express* 8, 1890-1901 (2018).
- [18] J. R. V. de Aldana, C. Romero, J. Fernandez, G. Gorni, M. J. Pascual, A. Duran, R. Balda, "Femtosecond laser direct inscription of 3D photonic devices in Er/Yb-doped oxyfluoride nano-glass ceramics," *Opt. Mater. Express* 10, 2695-2704 (2020).
- [19] R. Peyton, V. Guarepi, F. Videla, G. A. Torchia, "Key kinematic parameters in a low-loss power splitter written by femtosecond laser micromachining" *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 28(5), 055011 (2018).
- [20] D. A. Presti, V. Guarepi, F. Videla, G. A. Torchia, "Modeling of the refractive index profile of a femtosecond written waveguide in LiNbO₃". In *Photonic fiber and crystal devices: advances in materials and innovations in device applications XIII* (Vol. 11123, pp. 80-87). SPIE (2019).
- [21] V. Guarepi, C. Perrone, M. Aveni, F. Videla, G. A. Torchia, "Bending waveguides made in x-cut lithium niobate crystals for technological applications". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(12), 125023 (2015).
- [22] V. Guarepi, R. Peyton, E. Neyra, D. A. Presti, G. A. Torchia, "Significant improvement in optical propagation of lithium niobate written waveguides by a thermal annealing". *Optics & Laser Technology*, 149, 107871, (2022).



1. Introducción

En las últimas décadas la fotónica integrada ha despertado gran interés en múltiples campos de investigación y aplicaciones tecnológicas, debido principalmente a la gran potencialidad evidenciada en el desarrollo de nuevos dispositivos semiconductores, como así también de sistemas integrados a partir de materiales aisladores [1-3]. Podemos resaltar algunas áreas donde la fotónica integrada ha impactado de manera significativa, como por ejemplo comunicaciones ópticas, tecnología de láseres, amplificadores ópticos, biotecnología, espectroscopía, sensores integrados, entre otras. Dichos desarrollos pueden funcionar bien dentro de sistemas tecnológicos complejos, siendo parte de subsistemas formados sólo con elementos fotónicos y/o además pueden actuar como elementos de articulación entre la electrónica convencional y la pujante tecnología fotónica.

Para la fabricación de componentes y dispositivos fotónicos integrados se utilizan distintos métodos bien establecidos. Para Niobato de Litio podemos nombrar difusión de Zn y Ti e intercambio protónico. Para otros materiales se puede mencionar implantación iónica y fotónica de silicio. Sin embargo, muchas de estas técnicas tienen limitado el tipo de materiales aptos para ser funcionalizados y además los circuitos ópticos están implementados sobre un mismo plano (2D) [1-4].

La aparición de sistemas de láseres de pulsos ultracortos y su aplicación al procesamiento de materiales ópticos ha impulsado fuertemente el desarrollo de circuitos ópticos integrados usando esta tecnología. Algunos diseños fabricados mediante escritura directa son la base de dispositivos tecnológicos de aplicación en fotónica integrada, como el caso de divisores de haz, moduladores electro-ópticos, redes de difracción, como así también con este método es posible implementar sensores integrados, entre otros dispositivos. Gran parte del impulso de este campo se debe al auge de la fibra óptica como parte de una inmensidad de aplicaciones tecnológicas, entre las que podemos mencionar: sistemas de comunicaciones ópticas (redes de fibra al hogar), sensores de alta precisión o simplemente como guías de onda en un determinado rango espectral como fuentes de luz integradas [5-8]. Mediante la escritura con pulsos láser de femtosegundos, podemos destacar la posibilidad de grabar circuitos ópticos en materiales con propiedades ópticas interesantes, por ejemplo silicio, cuarzo, como así también cristales o vidrios dopados con elementos ópticamente activos, en particular tierras raras o metales de transición. Estos últimos elementos con el fin de desarrollar láseres o amplificadores ópticos [5,6].

Cuando se fabrican circuitos en materiales transparentes con esta tecnología, al enfocar el haz del láser en el material se genera una modificación local del índice de refracción en una pequeña región de este. A partir de esta modificación es posible generar caminos ópticos, que funcionan como guías de ondas. Es importante resaltar que en este método la modificación precisa del índice de refracción se basa en la absorción multifotónica generada en el proceso de interacción láser-materia [5]. Por este motivo esta tecnología permite la modificación de esta propiedad en numerosos materiales. Asimismo, esta técnica permite grabar estructuras de forma directa y en consecuencia promueve un rápido prototipado en el diseño de nuevos dispositivos. Esta técnica es adecuada también para la producción en baja escala, es de bajo costo y además posibilita la implementación de diseños fotónicos tridimensionales.

Por otro lado, con esta tecnología es posible obtener distintas características o comportamientos de las estructuras micro-mecanizadas así como también es posible desarrollar distintos métodos y sistemas para fabricar circuitos ópticos complejos. De acuerdo con el método y al material que se utilice, se pueden lograr diferentes características en los dispositivos fabricados, éstas pueden ser aprovechadas para lograr distintas aplicaciones específicas. A modo de ejemplo, con esta técnica es posible modificar periódicamente el índice de refracción en un material óptico. A partir de este proceso, se obtienen estructuras que funcionan como redes de Bragg, que pueden implementarse como filtros ópticos para longitudes de onda seleccionadas [9]. Asimismo, con esta estructuración periódica es posible desarrollar redes de difracción integradas tanto en superficie como en el interior de distintos materiales para diversas aplicaciones fotónicas [10].

La técnica de escritura láser emplea sistemas láser capaces de entregar pulsos de duración que van desde los picosegundos hasta femtosegundos. Los mismos ofrecen tasas de repetición que van desde los kHz hasta los MHz, y además proporcionan un amplio rango de energía por pulso de salida que va desde centenas de nJ a las decenas mJ. Para lograr el procesamiento de un material, por ejemplo, un material aislador transparente, es necesario concentrar energías del orden del μJ en un volumen muy pequeño (del orden de centenas de micrómetros cúbicos). Para ello el haz del láser debe ser enfocado mediante el uso de lentes de corta distancia focal. El haz de estos sistemas láser, en promedio presenta un diámetro aproximado de 8 mm que puede ser concentrado en ese volumen diminuto con la óptica adecuada, y por lo tanto su energía se transfiere muy localizadamente al material. Para lograr los distintos diseños es necesario recorrer la muestra con el haz de escritura, para ello se utilizan sistemas motorizados o espejos dentro de cabezales con micro movimientos accionados por piezo-eléctricos. La técnica más habitual es mantener fijo



el haz de láser enfocado en el interior del material mientras la muestra se mueve con sistemas de alta precisión. Este procedimiento se puede lograr fijando la muestra a un micro-posicionador motorizado controlado por un software a través de una PC. Hasta el momento se han reportado cuatro tipos de guías de onda fabricadas mediante esta técnica: tipo I, tipo II, tipo III y tipo IV [6], dependiendo de distintas condiciones en el proceso de escritura. Es de nuestro interés trabajar con guías de ondas ópticas del tipo II doble track, ya que presentan algunas propiedades interesantes como por ejemplo la permanencia inalterada de la guía de onda por varios años. En este caso, se requieren energías del orden de unidades de μJ , que focalizadas en un volumen focal pequeño originan el proceso de absorción multi-fotónica requerido. En guías tipo II doble track la forma de guiado se basa en generar dos paredes (tracks) separadas unas decenas de micrómetros. Entre éstas se obtiene la región de guiado, que como se detalla en la referencia [11] consiste en la superposición de la modificación de índice de refracción generada por cada uno de estos tracks. De esta forma al enfocar luz láser a la entrada, la misma queda confinada y permite la propagación de modos [6].

Podemos resumir que la escritura con pulsos de femtosegundos es una técnica que permite desarrollar distintas estructuras ópticas que pueden diseñarse o combinarse para ofrecer diferentes funcionalidades y/o aplicaciones específicas. Siguiendo esta línea, podemos asegurar que en las últimas décadas se ha dedicado un enorme esfuerzo para diseñar e implementar sensores basados en fotónica integrada. La combinación de distintos elementos o circuitos ópticos base de esta tecnología (por ejemplo: guías de onda recta, divisores, acopladores direccionales, anillos resonantes, interferómetros Mach Zehnder, entre otros) posibilitan el desarrollo de sistemas capaces de medir alguna propiedad específica a partir de luz guiada en estos sistemas. Estos sensores pueden estar codificados en intensidad, longitud de onda o en el tiempo. El fuerte avance de la tecnología de sistemas basados en fibra óptica y de los sistemas híbridos electrónicos-ópticos también ha impulsado necesariamente la integración de estas tecnologías naturalmente complementarias [12-16].

El objetivo principal de este trabajo es presentar un inédito diseño 3D de circuitos ópticos grabados en Niobato de Litio (LiNbO_3 -LNB) con láser de pulsos de fs utilizando estructuras de guías de onda Tipo II. El Niobato de Litio es por excelencia el material de referencia en fotónica integrada y cualquier diseño implementado sobre él, promete importantes y potenciales aplicaciones [4]. En la literatura sólo se han reportado este tipo de diseños fotónicos 3D basados en guías del tipo I y III fabricadas con esta tecnología [11, 17,18]. En particular, en el presente trabajo se han fabricado divisores, implementados a tramos rectos que recorren y varían su trayectoria en los tres ejes de coordenadas. También se realizó una caracterización sobre los parámetros de fabricación y del desempeño de guiado de luz en los dispositivos. El control y manipulación de este tipo de desarrollos presentan un amplio horizonte de aplicaciones tecnológicas aprovechando las características de los distintos materiales ópticos, como es el caso del cristal de LNB [18]. Asimismo, se puede escalar el desarrollo de estos divisores implementando señales moduladas en varias salidas, o que simplemente funcionen como multiplexores ópticos de 1×8 o 1×16 . Las variantes que permite esta tecnología son ilimitadas, más aún si consideramos utilizar otros materiales ópticos que puedan aportar distintas características relevantes y específicas para el diseño de nuevos dispositivos integrados.

2- Materiales y Métodos

En este trabajo, para fabricar un juego de guías de tipo II, se utilizó un sistema láser de pulsos de femtosegundos de Titanio Zafiro de la firma Spectra Physics modelo MAITAI- SPITFIRE. Este sistema láser emite pulsos de 150 fs de duración, centrados en una longitud de onda de 800 nm y con una frecuencia de repetición de 1 KHz. La energía utilizada para enfocar dentro de la muestra fue establecida en $0,7 \mu\text{J}$. Para el enfoque del haz láser en la muestra se utilizó un objetivo de microscopio 20X con una apertura numérica de 0,4. Los dispositivos se fabricaron en muestras provenientes de una oblea de LNB en corte X. La velocidad de escritura empleada fue de $35 \mu\text{m/s}$. Cabe destacar que con estos valores de energía y velocidad es posible asegurar una adecuada cadencia en la grabación, alcanzando así una mayor uniformidad en las estructuras grabadas [19]. Por otra parte, la separación entre los *tracks* que forman las guías de ondas fue de $20 \mu\text{m}$. Esta separación geométrica se corresponde con una estructura monomodo para una longitud de onda de 1550 nm [20]. A modo de resumen, en la Figura 1 se muestra un esquema del diseño de divisor 1×4 propuesto. En el mismo podemos notar que se utiliza un ángulo de apertura del divisor de $0,4^\circ$ para todas las salidas, que es un valor óptimo de este parámetro para la desviación de cada salida [21].

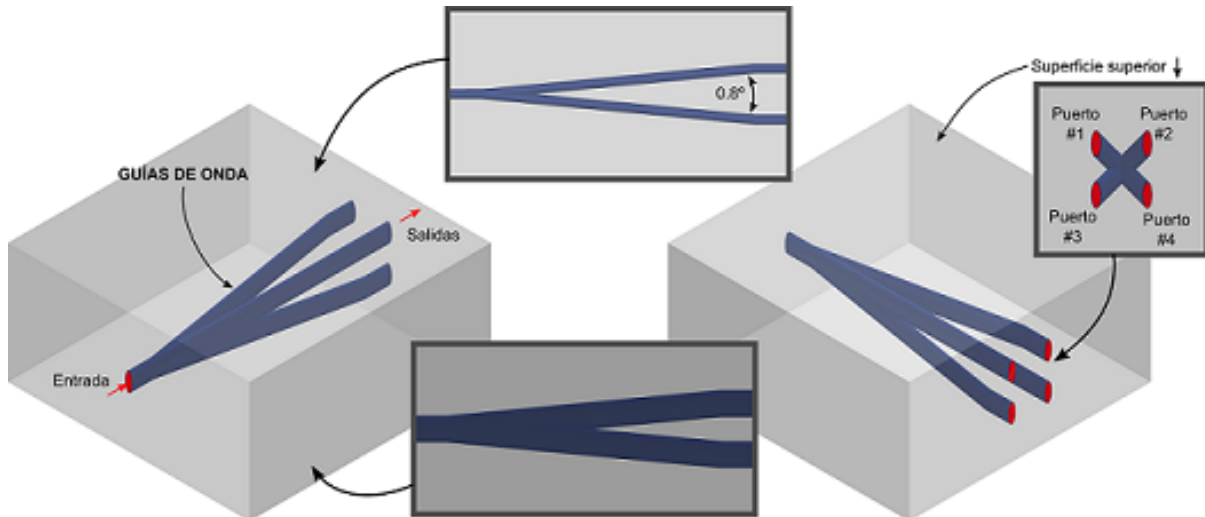


Figura 1: Esquema del dispositivo desarrollado. Se muestran de izquierda a derecha distintas perspectivas de uno de los dispositivos grabados en el cristal de LNB. En la primera imagen a la izquierda se indican la entrada y las salidas del divisor de haz. En la parte central de la figura, se presenta una vista superior donde se aprecia que el ángulo de apertura es de $0,4^\circ$, y una vista lateral de dos salidas. A la derecha se observa la primera imagen de la parte de atrás del divisor, con un detalle de la vista frontal de las cuatro salidas en el inserto.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la muestra utilizada para grabar las estructuras 3D fue obtenida de un cristal de LNB en corte X de 22 mm de longitud, que coincide con el largo de los dispositivos. Para el análisis se fabricaron dos dispositivos idénticos en un mismo sustrato, los cuales llamamos dispositivos D1 y D2. Cada uno de estos se diseñó con una entrada y cuatro salidas considerando un dispositivo divisor de potencia 1x4, tal como se detalla y puede observarse en la Figura 1. Los puertos de salida #1 y #2 son los más cercanos a la superficie superior del cristal, mientras que los puertos de salida #3 y #4 se encuentran a mayor profundidad en el seno del cristal. En la Figura 2 se muestran imágenes capturadas con un microscopio óptico, con objetivos de 10X y 50X. De estas imágenes se puede visualizar en detalle los cantos de entrada y salida de ambos dispositivos. Adicionalmente, en la Tabla 1 se detallan las medidas geométricas obtenidas para cada uno de los dispositivos fabricados.

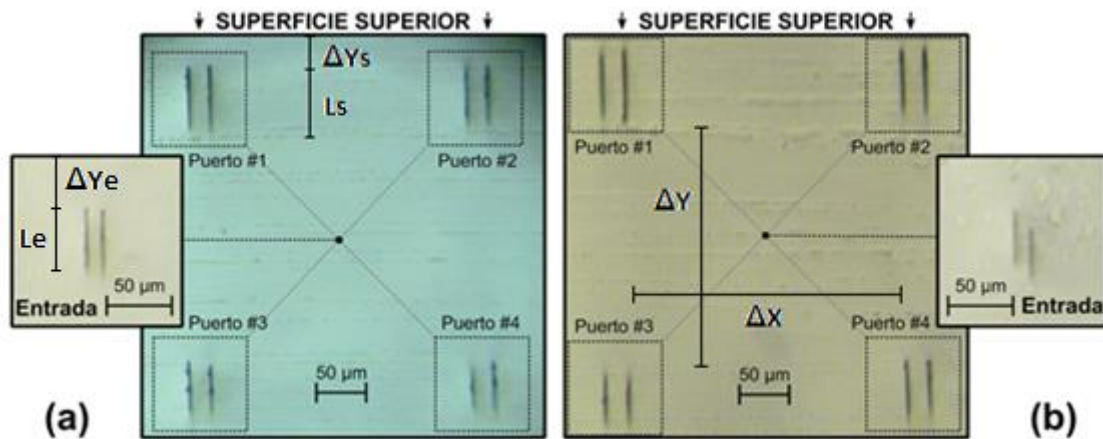


Figura 2: Imágenes de microscopio óptico tomadas de canto en donde se pueden apreciar los *tracks* de láser grabados con escritura directa: (a) dispositivo D1; (b) dispositivo D2. Asimismo, como insertos se detallan las guías tipo II de entrada para cada uno de los dispositivos estudiados en este trabajo. En ambas figuras se observan las dimensiones mencionadas en la Tabla 1, correspondientes a las estructuras fabricadas. ΔY_s : distancia desde la superficie hasta el comienzo de los *tracks* correspondientes a los puertos de salida #1-2. ΔY_e : distancia desde la superficie hasta el comienzo de los *tracks* de entrada de ambos dispositivos. ΔY : distancia de separación vertical entre los puertos #1-2 y #3-4. ΔX : distancia de separación horizontal entre los puertos #1-3 y #2-4. L_e , L_s : longitud de los *tracks* de entrada y de salida respectivamente.

Tabla 1: Dimensiones de los divisores de potencia analizados en este trabajo. Los valores están expresados en μm .

	Profundidad Salida (Δys)	Separación Vertical (ΔY)	Separación Horizontal (ΔX)	Longitud Tracks Superiores (Ls_{12})	Longitud Tracks Inferiores (Ls_{34})	Profundidad Entrada (Δye)	Longitud Tracks Entrada (Le)
D1	137	205	235	65	52	290	69
D2	135	215	225	65	58	305	63

Las pruebas de desempeño sobre los divisores se realizaron en un banco de acoplamiento preparado especialmente para la exploración y ensayo de guías de ondas ópticas. En nuestro caso se utilizó un sistema de acople del tipo “*end fire*” [21]. Los cantos de entrada y salida de la muestra fueron cuidadosamente pulidos utilizando lijas al agua números 350, 600 y 1000. Complementariamente, con el fin de optimizar el acople óptico en las estructuras, se buscó alcanzar calidad óptica en los cantos mediante pulido con pasta de diamante con granos desde 20 a 0.25 micrómetros. Después del proceso de pulido, la muestra con los divisores se ubicó sobre un soporte fijo dentro del sistema de acople. Mediante una estación de micro-posicionamiento con cinco grados de libertad (x , y , z y dos ángulos) se coloca una fibra óptica monomodo desnuda en la entrada de cada dispositivo, mientras que en la cara de salida se emplea un objetivo de microscopio 20X para recoger la luz guiada. Con este método, la luz acoplada en la entrada con la fibra óptica en el circuito óptico sale por el otro extremo. Estas estructuras de guías de onda tipo II en cristales de LNB, independientemente de la polarización de luz de entrada, sólo soportan la propagación de modos TM [11]. El objetivo de microscopio en la salida se utiliza para formar la imagen de campo cercano de la guía de onda y este se enfoca en una cámara CCD de 8 bits de la firma Newport. Este instrumento es específico para analizar el perfil de los modos guiados en este tipo de estructuras. Las fuentes utilizadas para acoplar luz en los dispositivos fueron diodos láser con longitudes de onda de 650 nm y 1550 nm. Las imágenes obtenidas en el analizador de haz fueron analizadas posteriormente mediante un algoritmo de procesamiento con el propósito de cuantificar la potencia guiada para cada modo.

3-Resultados y discusión

Luego de fabricar los prototipos deseados fue necesario determinar sus principales características entre ellas el guiado efectivo de luz, la longitud de onda que permiten propagar, las pérdidas, la relación de acoplamiento, entre otras. Cabe destacar que se realizaron dos tipos de mediciones complementarias para la caracterización de los dispositivos. Las mismas consistieron en medir la potencia transmitida a través de una guía de onda recta del mismo largo y fabricada con los mismos parámetros de escritura que los diseños estudiados. Al emplear una guía de onda recta podemos obtener una medida de las pérdidas por propagación más aquellas originadas en el acople y así de esa manera pudimos desafectar las pérdidas intrínsecas por división y desviación de los dispositivos. La primera caracterización realizada consistió en acoplar luz a la entrada de cada dispositivo utilizado como divisor 1x4. En una primera instancia se tomó la imagen de los cuatro puertos de salida acoplados simultáneamente. Para ello se ubicó la CCD a unos 20 cm del objetivo de microscopio 20X, como se detalla en la figura 3. Posteriormente se desplazó la cámara hasta 50 cm del objetivo de 20X y se ajustó levemente con el propósito de obtener una imagen ampliada de cada una de las salidas, las cuales se presentan separadamente en la figura 4. Este procedimiento se repitió para ambos dispositivos, reiterando las mediciones cinco veces. Con este procedimiento es posible realizar una estadística fiable sobre la capacidad de acople y el desempeño de cada salida del divisor. Como puede apreciarse de la Fig. 3 y Fig. 4., para cada una de las salidas del divisor se observa un comportamiento multimodal para luz láser acoplada a 650 nm. Para el caso de testeo con luz láser de 1550 nm, no se registró guiado a esta longitud de onda.

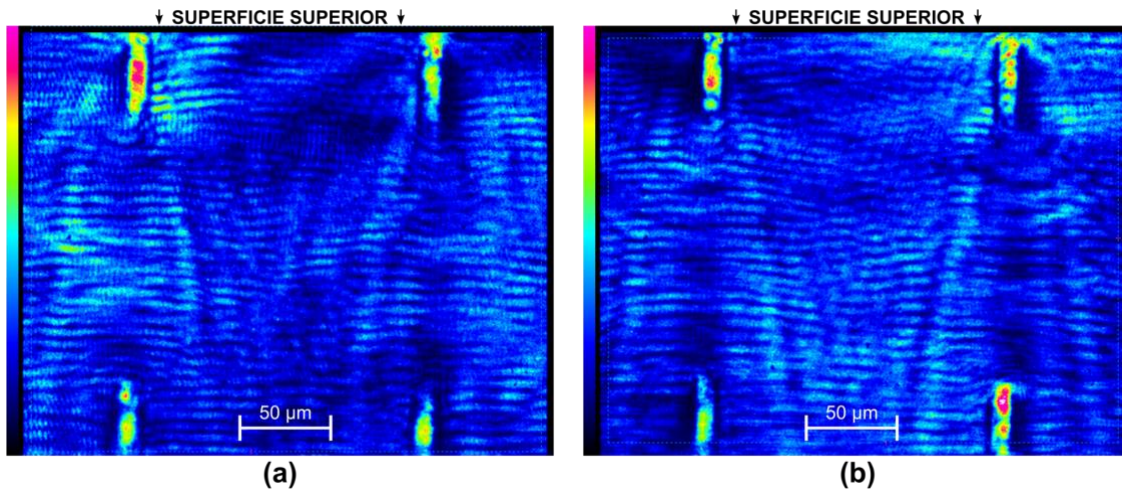


Figura 3: Imagen de los cuatro modos a la salida de los dispositivos caracterizados como divisor 1x4, acoplados con láser de 650 nm: **(a)** dispositivo D1; **(b)** dispositivo D2.

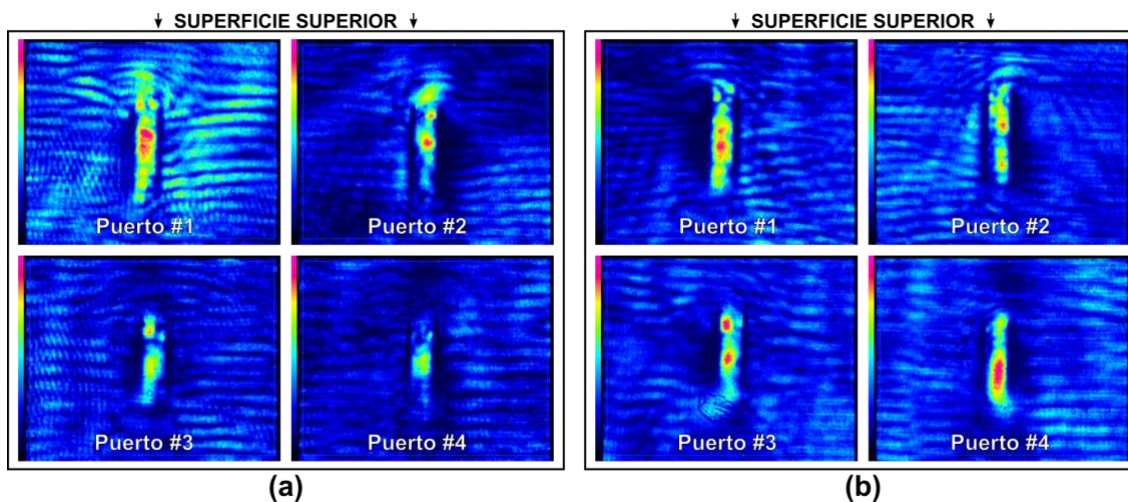


Figura 4: Imagen de los modos guiados individualizados por cada uno de los puertos de salida correspondientes a los dispositivos D1 y D2 caracterizados como divisores 1x4, acoplados con láser de 650 nm: **(a)** dispositivo D1; **(b)** dispositivo D2.

Por otro lado, hemos observado que existe una notable correspondencia entre el acople de la fibra óptica en la entrada y la variación en la relación de potencia de salida de cada dispositivo fabricado. Una pequeña modificación en uno de los cinco grados de libertad del posicionamiento de la fibra interviene directamente en la relación de potencia de acople de cada salida del divisor. Para el tipo de diseño propuesto como divisor es esperado que resulte a la salida una distribución balanceada de potencia en cada puerto de salida, sin embargo, podría requerirse un dispositivo con otro diseño que solo sea capaz de dividir la señal de entrada sin importar el nivel de potencia de cada división. En la figura 3 se observa que, a pesar de proponer diseños idénticos en cuanto a repetibilidad en el proceso de grabación, y consecuentemente que ofrezcan el mismo desempeño, existen diferencias en el funcionamiento de cada dispositivo.

Cabe destacar que todas las mediciones obtenidas después del procesamiento de imágenes para ambos dispositivos utilizados como divisores se presentan en las tablas 2 y 3. En particular los datos para el dispositivo D1 y el dispositivo D2 se muestran en la tabla 2 y en la tabla 3, respectivamente. La última columna representa la eficiencia del divisor (η_{splitter}) considerando como base de cálculo que la guía de onda recta impone una transmisión de -5,69 dB (27,00 %) de la potencia total del láser. Esta medida corresponde a una guía de onda recta considerando las pérdidas por propagación como así también las de acople. Teniendo en cuenta este valor, al analizar la salida de cada puerto del divisor, podemos reflejar sólo las

pérdidas debidas únicamente a la división y desviación, es decir, no se tienen en cuenta las pérdidas por propagación ni aquellas originadas en el acople fibra óptica-divisor [19].

Tabla 2: Mediciones del dispositivo D1. Se presentan 5 mediciones de transmisión expresadas dB para cada puerto, dando el valor medio y el error medio cuadrático. Asimismo, en las últimas columnas de la derecha se muestra la transmisión total en dB y la eficiencia de cada puerto. Los datos de la tabla están normalizados al valor de pérdidas totales para una guía de onda recta de la misma longitud que los dispositivos.

Mediciones	Puerto #1	Puerto #2	Puerto #3	Puerto #4	TOTAL	η_{SPLITTER}
#1	-9,58	-13,98	-15,23	-20,00	-7,21	0,71
#2	-10,97	-13,01	-16,99	-20,00	-7,26	0,58
#3	-10,00	-11,55	-16,99	-13,98	-6,20	0,89
#4	-10,00	-15,23	-13,98	-16,99	-7,45	0,68
#5	-10,46	-12,22	-13,01	-13,98	-6,20	0,88
Media	-9,86	-13,20	-15,24	-16,99	-6,86	0,75
Error medio absoluto	-20,00	-13,39	-11,97	-11,48	-9,77	0,11

Tabla 3: Mediciones del dispositivo D2. Se presentan 5 mediciones de transmisión expresadas dB para cada puerto, dando el valor medio y el error medio cuadrático. Asimismo, en las últimas columnas de la derecha se muestra la transmisión total en dB y la eficiencia de cada puerto. Los datos de la tabla están normalizados al valor de pérdidas totales para una guía de onda recta de la misma longitud que los dispositivos.

Mediciones	Puerto #1	Puerto #2	Puerto #3	Puerto #4	TOTAL	η_{SPLITTER}
#1	-10,97	-13,98	-20,00	-10,46	-6,38	0,85
#2	-16,99	-13,01	-15,23	-10,00	-7,21	0,70
#3	-12,23	-13,01	-15,23	-10,46	-6,38	0,85
#4	-10,46	-13,01	-13,98	-12,23	-6,02	0,91
#5	-10,46	-13,01	-11,55	-12,23	-5,69	0,98
Media	-12,22	-13,20	-15,20	-11,08	-6,34	0,86
Error medio absoluto	-16,25	-17,26	-14,87	-17,62	-7,83	0,07

Asimismo, en la figura 5 se representa la estadística de estas mediciones como un gráfico de cajas. Aquí se puede apreciar la distribución de la transmisión de cada puerto y dispositivo, así como también la relación de acoplamiento. A partir de los datos mostrados en la Fig. 5 podemos observar que en el dispositivo D1 es notoria la diferencia en la relación de acoplamiento entre puertos, en particular los puertos superiores transmiten alrededor del 70% de la potencia acoplada. En el dispositivo D2 esta relación está balanceada más equitativamente, aunque persiste una cierta diferencia en la relación de acoplamiento entre los puertos de salida. Finalmente, en ambos casos se puede observar que la incidencia de las variaciones en cada ensayo en los dispositivos queda de manifiesto en la dispersión de los datos medidos. Por ejemplo, en el puerto 4 del dispositivo D2 se obtuvo una dispersión total de 30% en la relación de acoplamiento, este dato corresponde a la situación más desfavorable registrada en este trabajo.

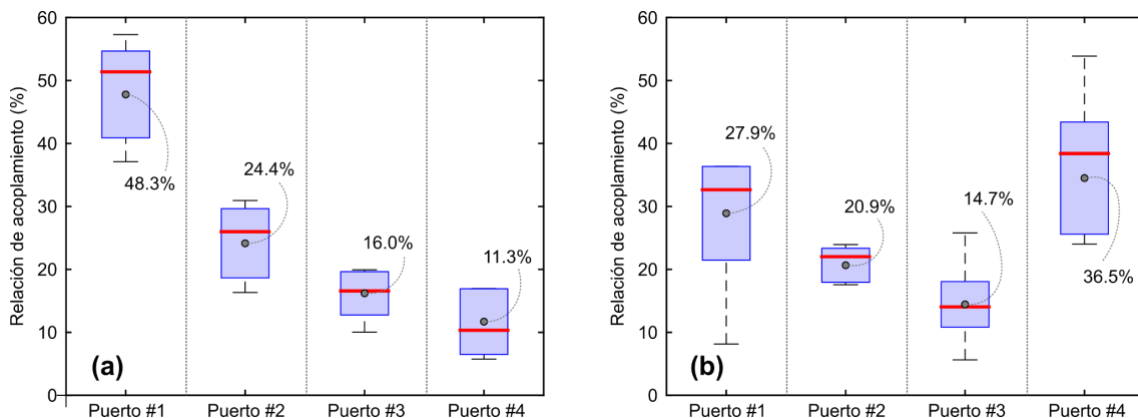


Figura 5: Relación de acoplamiento: (a) dispositivo D1; (b) dispositivo D2. En el diagrama de cajas se puede visualizar los valores medios con punto, mediana con línea roja y dispersión en formato de cajas y líneas segmentadas de los datos obtenidos para cada puerto correspondiente a cada uno de los dispositivos analizados.

Complementariamente, como pudo observarse en la tabla 1, la longitud de los *tracks* correspondientes a los puertos inferiores es menor que la de los tracks de los puertos superiores. Esto es posible considerarlo como consecuencia del aumento de la longitud focal a medida que el haz se enfoca a mayores profundidades en el seno del material. En efecto, el haz del láser enfocado dentro del material se alarga considerablemente debido a la aberración esférica. Como consecuencia de esta nueva distribución de energía en el foco del haz de escritura, los efectos no lineales de modificación del material no se producen en la misma longitud que para profundidades menores, observándose una sensible reducción de la longitud de los *tracks*.

Este hecho influye consecuentemente en la diferencia observada entre las relaciones de acople de los puertos superiores y los puertos inferiores. Esto se corresponde con lo mencionado anteriormente. En el dispositivo D1, en donde la diferencia de longitudes entre *tracks* superiores e inferiores es más apreciable, se registró una mayor diferencia en la relación de acople, este hecho se puede apreciar claramente en la figura 4a. En contraparte, en el dispositivo D2 se registró una diferencia menor en el largo de los *tracks* entre los puertos superiores e inferiores, lo cual se puede corroborar observando una más equilibrada distribución de energía en los puertos de salida como se aprecia en la figura 4b (ver Tabla 1).

La siguiente caracterización de los dispositivos, consistió en acoplar luz a través de cada puerto de salida por separado y observar la luz guiada a través de la entrada. Este procedimiento se llevó a cabo en ambos dispositivos D1 y D2. En este caso estamos empleando los dispositivos como combinadores de señales. Las imágenes de los modos obtenidos en este procedimiento se muestran en la figura 6. Para este experimento también se realizaron cinco mediciones de cada puerto a fin de analizar estadísticamente el desempeño de esta función en cada dispositivo estudiado. A partir de los resultados obtenidos es posible determinar el grado de acople de cada salida, de forma individualizada.

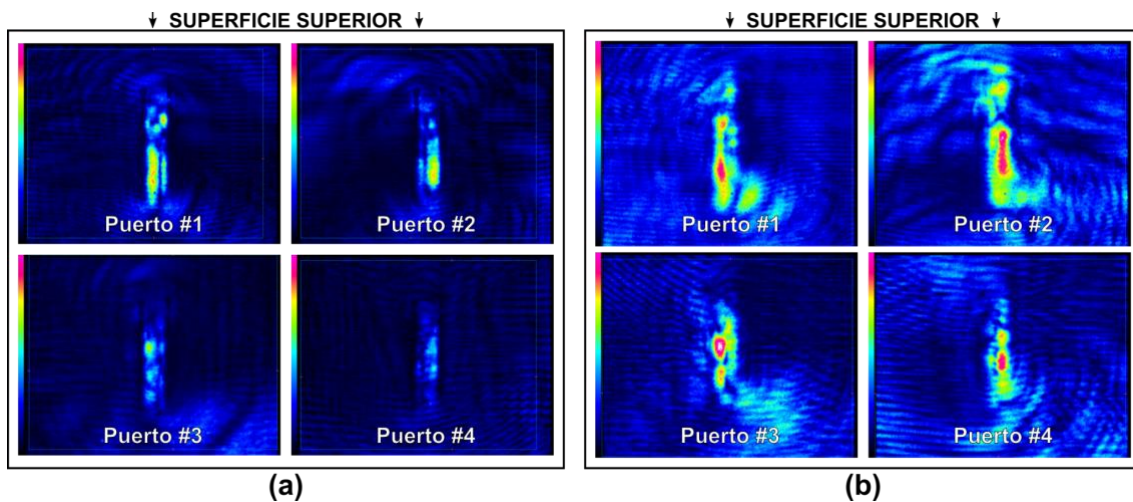


Figura 6: Imagen de los modos individualizados para cada puerto de salida correspondientes al sistema implementado como combinador 4x1, acoplados con láser de 650 nm: **(a)** dispositivo D1; **(b)** dispositivo D2.

Al comparar el funcionamiento de cada dispositivo como divisor (figura 4) y como combinador (figura 6), es notable observar de estas figuras que la relación de acoplamiento para cada puerto individual se mantiene constante, independientemente del tipo de función que cumple el dispositivo, es decir, ya sea como divisor o como combinador. Si bien no acopla la misma potencia, se mantiene la relación de acoplamiento para cada puerto observada en los ensayos anteriores.

4-Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un circuito óptico grabado con escritura láser en LNB, cuyo diseño 3D es inédito, y adicionalmente es en esencia un dispositivo compacto para la tecnología de fabricación empleada. Se han fabricado dos circuitos de división de potencia 1x4 idénticos, que globalmente presentan comportamientos muy similares. Cabe destacar que los dispositivos propuestos han demostrado ser efectivos en su desempeño tanto usados como divisores de haz, así como combinadores, dos funciones que son de gran utilidad en el campo de las comunicaciones ópticas. Se han realizado pruebas de caracterización a las estructuras fabricadas, tomando como referencia una guía de onda recta. Durante las pruebas de

acoplamiento se pudo verificar un comportamiento de guiado multimodo utilizando un láser con una longitud de onda de 650 nm. Sin embargo, no observamos guiado al ensayar los dispositivos empleando un láser de 1550 nm (longitud de onda de comunicaciones ópticas). Suponemos que este comportamiento se debe a las modificaciones en la separación efectiva de los *tracks*, principalmente en la zona de división del divisor. Esta región es la más sensible debido a que se efectúan múltiples pasadas del haz láser de escritura que podría producir un evidente estrechamiento de la zona efectiva de guiado. Esto hecho podría superarse si se realiza un ligero cambio en el diseño del circuito, buscando minimizar la superposición de los *tracks* del láser en la zona de la división. Por otra parte, al caracterizar el funcionamiento como divisor se observa que existe una diferencia de guiado entre los puertos de salida de cada dispositivo. En este caso podemos suponer que los puertos de salida más cercanos a la superficie del cristal guían más energía debido a diferencias en el grabado con los puertos de salida inferiores, relacionadas directamente con el proceso de escritura a mayor profundidad. Sin embargo, se visualiza que el dispositivo D2 no se comporta de ese modo. Esto puede inferir que ligeras modificaciones en el proceso de fabricación permiten alcanzar una división de energía mucho más simétrica. En el mismo orden, hemos observado que la distribución de la energía también responde fuertemente al micro-posicionado de la fibra óptica a la entrada del dispositivo. Por otro lado, en cuanto al diseño se pudo observar que las estructuras fabricadas muestran cierta repetitividad, rubricado en la similitud en los datos experimentales medidos, aspecto que es sumamente importante para la técnica de fabricación. Finalmente, al tratarse de divisores se puede proyectar a futuro aplicar a los mismos circuitos diferentes procesos de optimización como desviación curva ya probados en nuestro laboratorio, en particular podemos citar la estrategia basada en la teoría del acoplamiento coherente [19]. Asimismo, se pueden someter los dispositivos grabados a un recocido térmico que produce una reducción notable de las pérdidas y mejora su el guiado de luz [22].

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos PICT-2016-4086 y PICT-2017-0017 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Además, este trabajo fue financiado también por los proyectos PUNQ and PPROF de la Universidad Nacional de Quilmes, ambas son instituciones patrocinadoras pertenecientes a la República Argentina.