

Fotónica integrada para el desarrollo de láseres y biosensores.

Integrated photonics for the development of lasers and biosensors.

Gloria Verónica Vázquez García* (1).
Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.
gvvazquez@cio.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 25, 2024; aceptado en octubre 12, 2024.

Resumen.

En la actualidad existe una tendencia a la miniaturización de componentes, es aquí donde las guías de onda ópticas tienen un papel fundamental ya que son los bloques básicos de dispositivos integrados. En esta plática se mencionan algunas aplicaciones de la fotónica integrada y se presenta el trabajo que hemos realizado sobre el desarrollo de microcomponentes ópticos basados en guías de onda en cristales activos y vidrios. Las principales motivaciones han sido el desarrollo de láseres compactos y sensores integrados; en particular, nuestro interés se centra en la posibilidad de detectar muestras biológicas en cantidades muy pequeñas.

Palabras clave: Escritura láser, fotónica integrada, implantación iónica, láseres, sensores.

Abstract.

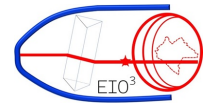
Nowadays there is a trend towards the miniaturization of components, where optical waveguides play a fundamental role as the basic blocks of integrated devices. In this talk a few applications of integrated photonics are presented as well as our work regarding the development of optical microcomponents based on waveguides in crystals and glasses. The main motivation has been the development of compact lasers and sensors; particularly, our interest resides on the possibility to detect small volumes of biological samples.

Keywords: Ion implantation, integrated photonics, laser writing, lasers, sensors.

1. Descripción de la conferencia.

La fotónica integrada consiste en la miniaturización de componentes, donde se pueden realizar diferentes funciones en un material con un volumen muy pequeño. La luz se puede generar, derivar, filtrar, modular, multiplexar, detectar en este mismo material. Los circuitos electrónicos son reemplazados por circuitos fotónicos debido a la velocidad de la luz con respecto a la de los electrones, de tal manera que la información se puede procesar de una manera mucho más rápida y la cantidad de información que se procesa es mucho mayor (Hunsperger, 2009).

Los bloques básicos de la fotónica integrada son las guías de onda ópticas, las cuales se forman con un material cuyo índice de refracción es mayor al medio que lo rodea. El índice de refracción es una medida de cuánto se reduce la velocidad de la luz en un medio. El grosor de una guía de onda es mucho menor que el grosor de un cabello. Existen diferentes tipos principales de guías de acuerdo a su geometría: a) las guías de onda planas, las cuales están formadas



por un sándwich de material donde el confinamiento de la luz se da en una sola dirección; b) las guías angostas, que pueden tener una sección transversal cuadrada o rectangular principalmente y el confinamiento de la luz se da en dos direcciones; y c) las fibras ópticas, las cuales tienen una sección transversal circular y están compuestas de un núcleo de mayor índice de refracción que el revestimiento que lo rodea. La **Fig. 1** muestra estos tipos de guías.

En este trabajo se presentan dos dispositivos fotónicos, los láseres y los sensores basados en guías de onda; los primeros tienen potenciales aplicaciones en las comunicaciones, terapia médica de baja intensidad e iluminación, entre otras. Los segundos basan su motivación en el desarrollo de sensores compactos para la detección de sustancias biológicas que puedan ser usados en el diagnóstico de enfermedades.

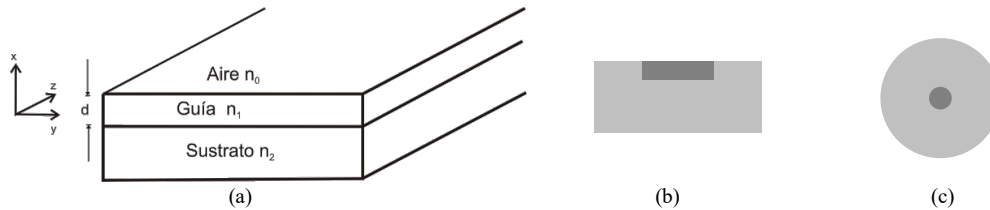


Figura 1. Tipos de guías de onda: (a) plana, (b) angosta, (c) fibra óptica. Las regiones más oscuras en (b) y (c) tienen mayor índice de refracción que las zonas menos oscuras.

2. Métodos.

2.1 Láseres de guía de onda.

Hemos fabricado láseres de guías de onda planas y angostas en cristales y vidrios dopados con tierras raras tales como Nd:YAG, Nd:YVO₄, Yb:YAG y Er:Yb:silicato utilizando la técnica de implantación iónica mediante un acelerador Peletrón del Instituto de Física de la UNAM; mediante esta técnica se hace incidir un haz de iones (H^+ , He^+ , C^{2+} , Cu^+) en el material a energías del orden de MeV provocando ionización y colisiones nucleares que resultan generalmente en una reducción de la densidad del material y, por ende, una reducción del índice de refracción al final de la trayectoria de los iones (*ie.* a una profundidad de unas cuantas micras). La guía de onda se forma entonces entre el aire o región superior de bajo índice y la región de menor índice producida por la implantación, ver **Fig. 2**.

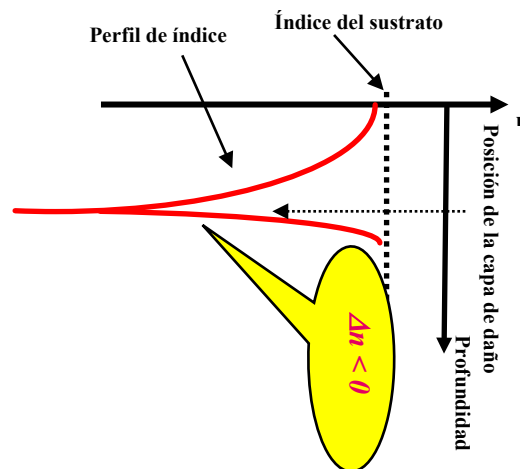


Figura 2. Perfil de índice de refracción de una guía de onda fabricada por implantación iónica.

Para observar las propiedades de las guías de onda, medimos la forma en que se propaga la luz, la forma como cambia el índice de refracción generando las guías, cuánta luz se pierde, se absorbe o se emite, así como realizamos pruebas de la emisión láser en las guías (Flores-Romero, et al, 2007; Sánchez-Morales, et al, 2009). Para dichas pruebas se utiliza un láser cuya longitud de onda de operación sea fuertemente absorbida por los iones de tierras raras y para formar la cavidad láser al cristal o vidrio se le depositan en sus extremos películas delgadas que actúan como espejos, un espejo de entrada con alta reflectividad y un espejo de salida con reflectividad un poco menor al 100%.

2.2 Sensores de guía de onda.

Hemos fabricado dispositivos fotónicos para sensado mediante la técnica de escritura láser en vidrios de portaobjetos y sustratos de sílice fundida. La generación de las guías de onda se logra enfocando un láser de femtosegundos mediante un objetivo de microscopio en la muestra, de manera que se deposita energía en cada pulso ultracorto provocando cambios de índice de refracción en el material. Utilizamos dos configuraciones principalmente: a) guía de onda embebida, en este caso el haz láser se enfoca en el interior del sustrato y la guía de onda se genera directamente en la región escrita; b) guía de onda superficial, en donde el haz se enfoca sobre la superficie del sustrato y se remueve material generando dos ranuras de bajo índice de refracción separadas cierta distancia, de manera que la guía de onda se forma entre este par de ranuras. Un esquema de estas dos configuraciones se muestra en la **Fig. 3**.

Particularmente, se fabricaron interferómetros Mach-Zehnder (IMZ), los cuales constan de un canal de entrada el cual se divide en dos brazos que se unen nuevamente en un canal de salida. Al hacer incidir luz en el IMZ se obtiene un patrón de interferencia a la salida. Si se deposita alguna sustancia (analito) sobre uno de los brazos del IMZ (brazo de sensado) se generará un cambio de índice de refracción entre dicho brazo y el segundo brazo (brazo de referencia) que se puede medir en términos de un corrimiento en longitud de onda en el espectro de transmisión del IMZ. Se realizó una prueba de sensado de temperatura con una variación de 30 °C a 75 °C en pasos de 15 °C. Una segunda prueba se llevó a cabo para detectar urea disuelta en agua ultrapura a varias concentraciones.

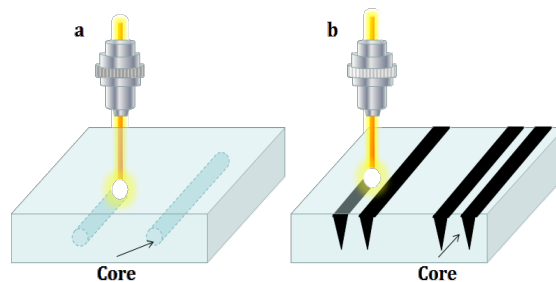


Figura 3. Configuraciones utilizadas para fabricar guías de onda por escritura láser: a) guías embebidas, b) guías superficiales (*Core* es la guía de onda).

3. Desarrollo.

3.1 Láseres de guía de onda.

La **Fig. 4** muestra imágenes obtenidas mediante microscopio de guías planas obtenidas mediante implantación iónica. Se puede observar con un contraste de color la zona de daño generada por los iones, separando la región de la guía del resto del sustrato. La energía de implantación define el grosor de la guía, en la imagen 1 la guía de onda se obtuvo con una energía mayor con respecto a la guía de la imagen 2.

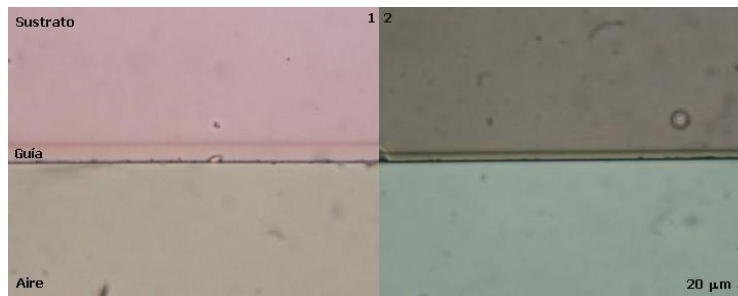
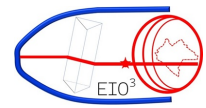


Figura 4. Imágenes de microscopio de guías de onda planas fabricadas con diferentes energías: 1) 5 MeV, 2) 1 MeV.

La **Fig. 5a** muestra una imagen de microscopio de guías angostas con 3 anchos, (a) 10, (b) 15 y (c) 20 μm , obtenidas usando una mascarilla de níquel-cobalto durante la implantación. Las secciones transversales de las guías se pueden observar en la interfaz entre el aire y el sustrato con los 3 anchos. La **Fig. 5b** muestra la forma como se propaga la luz en las guías de onda, a la cual se le llama modos de propagación, ya que la luz se comporta como una onda electromagnética. Dependiendo del ancho de la guía se pueden observar de uno a tres modos de propagación, llamados TEM (transversal electromagnético).

Los láseres desarrollados emiten en el infrarrojo cercano y las potencias de salida son del orden de mW, por lo que pueden ser usados en comunicaciones, terapia médica de baja intensidad e iluminación mediante conversión de la luz infrarroja a visible.

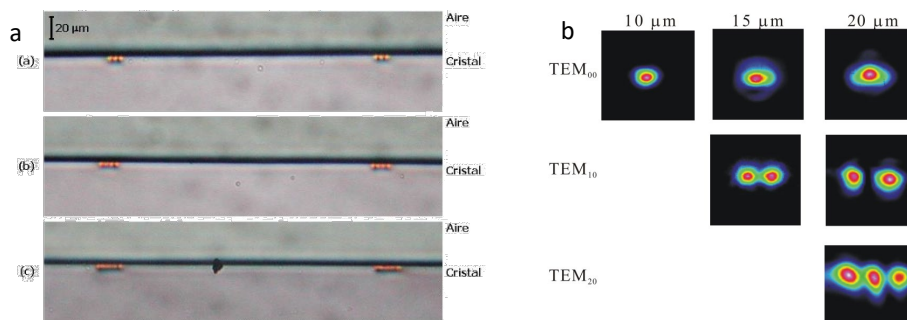


Figura 5. a) Imagen de la sección transversal de guías angostas, b) modos de propagación en las guías.

3.2 Sensores de guía de onda.

Para las pruebas de sensado de variación en temperatura se obtuvo el espectro de transmisión del IMZ que se muestra en la **Fig. 6a**. Los corrimientos en longitud de onda obtenidos entre 30 °C y 75 °C son muy pequeños, de manera que al graficar dichos corrimientos en función de la temperatura, se obtiene una sensibilidad de $\sim 54 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (un picómetro es la billonésima parte de un metro), ver **Fig. 6b** (Tapia-Licona, et al, 2023), la cual es comparable a valores obtenidos para IMZ fabricados en silicio mediante litografía, sin embargo, en nuestro trabajo tenemos la ventaja de poder fabricar el dispositivo en 3D mediante la escritura láser directa con pulsos de femtosegundos.

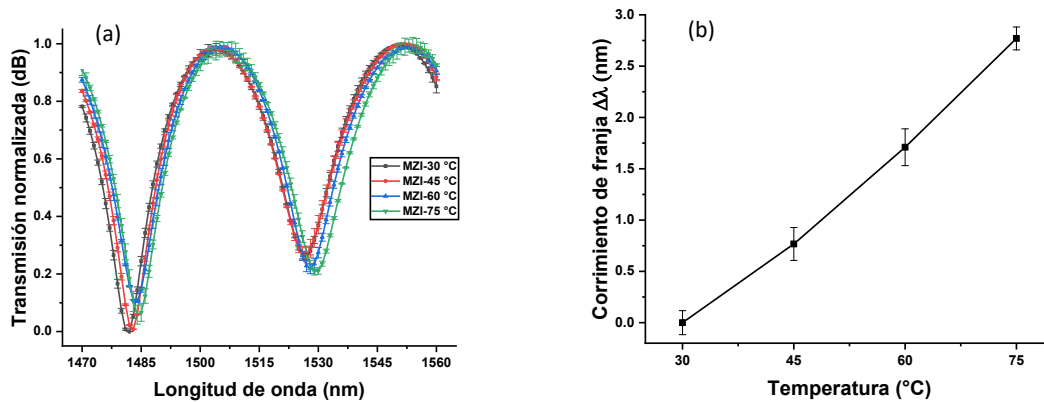


Figura 6. (a) Espectro de transmisión del IMZ a diferentes temperaturas, (b) corrimiento de la longitud de onda en función de la temperatura.

Con respecto a las pruebas de concentraciones de urea, la **Fig. 7a** muestra los espectros de transmisión del IMZ variando la concentración desde 1×10^{-15} M hasta 0.1 M. La **Fig. 7b** presenta la respuesta del corrimiento de la longitud de onda en función de la concentración, con la cual se obtiene una sensibilidad de 0.43 nm/M (un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro). Es interesante notar que se logró un límite de detección bajo, 0.42 pM (Tapia-Licona, et al, en revisión), esto es, la mínima concentración que es posible detectar.

Como trabajo futuro, buscamos poder integrar estos IMZ con fibras ópticas y canales microfluídicos para desarrollar dispositivos optofluídicos compactos que puedan ser usados para la detección de analitos tales como glucosa y colesterol y así poder contribuir al diagnóstico de enfermedades.

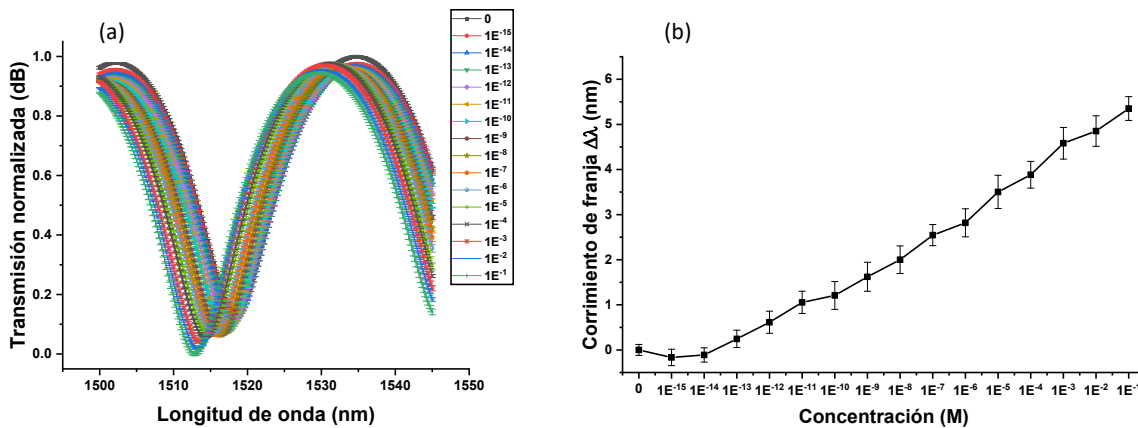
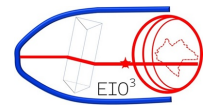


Figura 7. (a) Espectro de transmisión del IMZ a diferentes concentraciones de urea, (b) corrimiento de la longitud de onda en función de la concentración de urea.

Conclusiones.

La fotónica integrada permite el desarrollo de dispositivos compactos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones, tales como comunicaciones, sensado, medicina e industria. En particular, se pueden diseñar láseres basados en guías de onda dependiendo de los requerimientos de longitud de onda de operación, potencia y régimen continuo o pulsado. Por otro lado, los sensores compactos tienen un gran potencial para la detección de analitos, lo cual es crítico en el diagnóstico de enfermedades. La ventaja de estos sensores es que son portátiles y pueden ser llevados al lugar donde se encuentra el paciente, de manera que se pueda comenzar con un tratamiento tras el diagnóstico en caso de detectar alguna anomalía.



Créditos.

Se agradece el financiamiento otorgado por el CONAHCYT mediante el proyecto CF-376135 para el desarrollo de dispositivos fotónicos de sensado.

Referencias bibliográficas.

Flores Romero, E. et al (2007). *Laser emission in proton-implanted Nd:YAG channel waveguides.* Optics Express, 15, 17874-17880.

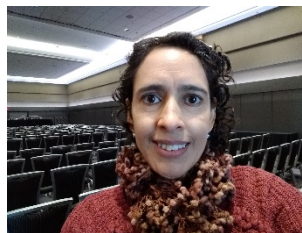
Hunsperger, R. G. (2009). *Integrated Optics Theory and Technology,* Springer.

Sánchez Morales, M. E. et al (2009). *Laser emission in Nd:YVO₄ channel waveguides at 1064 nm.* Applied Physics B 94, 215-219.

Tapia-Licona, L. A. et al (2023). *Design and fabrication of Mach-Zehnder interferometers in soda-lime glass for temperature sensing applications,* Applied Optics 62, 1214-1220.

Tapia-Licona, L. A. et al (en revisión). *Unbalanced Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser direct writing for sensing of urea concentrations via evanescent field interaction.* Enviado a Optics and Laser Technology.

Biografía del investigador.



Gloria Verónica Vázquez García realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Sussex, Reino Unido, con el tema de investigación: “Advances in quality of optical waveguides in Nd:YAG and LiNbO₃” y obtuvo el grado en Agosto de 2000. Actualmente es investigadora titular en el Centro de Investigaciones en Óptica en León, Gto. Su trabajo de investigación está relacionado con la fabricación, caracterización y aplicaciones de dispositivos fotónicos integrados. Obtuvo el nombramiento Nivel I en el SNI de 2001 a 2007 y Nivel II a partir de enero de 2008.