

Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm, mediante un sistema de rejilla Bragg de fibra óptica sintonizada por tensión mecánica*

Raúl Benítez-Álvarez

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC)
Departamento de láser y fibras ópticas
Cerrada cecati s/n Col Santa Catarina alcaldía de
Azcapotzalco, CP 02250, Ciudad de México.
MÉXICO

correo electrónico (email):
rbentz-mx@hotmail.com

Recibido 13-02-2020, aceptado 10-04-2020.

Resumen

Una de las características más importantes del análisis espectroscópico es la posibilidad que nos ofrecen las técnicas e instrumentos para explorar las estructuras atómicas y moleculares de algunos compuestos químicos, analizando el efecto directo sobre los fotones de la radiación utilizada para la interacción de materia y energía. Actualmente con el desarrollo de las tecnologías de miniaturización de componentes electrónicos basados en óxido de silicio, es posible diseñar dispositivos ópticos, que partiendo de las leyes de la fotónica, amplían aún más el campo de oportunidad científico y tecnológico de estas técnicas de análisis.

En este trabajo se muestra el diseño de un sistema multicanal basado en fibras de óxido de silicio SiO₂ a los cuales se les imprime una variación en el índice de refracción, con el propósito de ser utilizados como filtros para suprimir líneas de emisión en longitudes de onda particulares; se muestra el resultado en una longitud de onda de interés para las telecomunicaciones a 1550 nm y se describe un diseño conceptual

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

de convertidor multifibra para su fabricación con tecnología de micromaquinado.

Palabras clave: rejillas Bragg, linternas fotónicas, fibra óptica.

Abstract
(Suppression of an Infrared Emission Line at 1550 nm Using a Bragg Fiber Optic Rating System, Tuned by Mechanical Stress)

One of the most important characteristics of spectroscopic analysis is the possibility offered by techniques and instruments to explore the atomic and molecular structures of some chemical compounds, analyzing the direct effect on the photons of the radiation used for the interaction of matter and Energy. At the moment with the development of the technologies of miniaturization of electronic components based on silicon oxide it is possible to design optical devices that, starting from the laws of photonics, further expand the field of scientific and technological opportunity of these analysis techniques.

This work shows the design of a multi-channel system based on SiO₂ silicon oxide fibers to which a variation in the refractive index is printed, with the purpose of being used as filters to suppress emission lines in lengths particular wave; The result obtained in a wavelength of interest for telecommunications at 1550 nm is shown and a conceptual design of a multi-fiber converter for manufacturing with micro-machining technology is described.

Index terms: Bragg grating, photonics converters, optics fiber.

1. Introducción

Convencionalmente las fibras ópticas de óxido de silicio han sido utilizadas ampliamente en el campo de las telecomunicaciones por su gran versatilidad para transmitir múltiples señales en anchos de banda amplios. Desde su invención en la

década de los 60 fue notorio el enorme potencial que representaba el diseño de una guía de onda en donde la información, a diferencia de las comunicaciones basadas en flujo de electrones, cambiaba para dar paso a la transmisión de ondas electromagnéticas específicamente fotones; sin embargo, a pesar de los avances en las técnicas para la fabricación de fibras ópticas (FO) de bajas pérdidas de potencia, la búsqueda de procesos de manufactura que garanticen la producción de núcleos de óxido de silicio cada vez más puros, permite reconsiderar que tal vez cierto nivel de impurezas podría ser ventajoso para algunos propósitos de interés en fotónica.

Desde el diseño mismo de las fibras ópticas y los fenómenos físicos que le dan sustento como una guía de ondas electromagnéticas, el índice de refracción juega un papel importante al ser uno de los responsables de la propagación de ciertas longitudes de onda a través de la estructura amorfa del SiO₂; sin embargo, el índice de refracción tanto en el núcleo como el revestimiento de la FO está perfectamente definido presentando un cambio notable en la transición entre el núcleo y revestimiento, dando una estructura de paso escalonado en la dirección transversal del material con respecto al eje principal de la guía de onda.

El índice de refracción puede tener un cambio en la dirección de la guía de onda y, en algunos casos, esta variación puede presentar una modulación periódica proporcionando un patrón perfectamente definido. Las impurezas intrínsecas de las fibras de óxido de silicio le imprimen una sensibilidad propia a ciertas longitudes de onda particularmente a la radiación ultravioleta, estableciendo una dependencia funcional con relación a la absorción α_i para cierto intervalo de longitud de onda $\Delta\lambda$ [1]; el índice de refracción cambia sensiblemente y de manera permanente, alterando localmente la densidad del material en un punto particular.

La relación de Kramers-Kroning ayuda mucho a comprender este principio, según la ecuación (1). El cambio en el índice de refracción $\Delta n(\lambda)$ a una cierta longitud de onda λ , se puede estimar como un proceso integrado de varias longitudes de onda discretas λ' , cuando estas son medidas en entornos discretos del material con coeficientes de absorción $\Delta\alpha_i$

$$\Delta n(\lambda) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_i \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\Delta\alpha_i(\lambda')\lambda'^2}{(\lambda^2 - \lambda'^2)} d\lambda' \quad (1)$$

La técnica para el trazado de estos patrones regulares en el núcleo, modificando el índice de refracción de la fibra óptica, está sustentada en el principio de interferencia constructiva por exposición de haces de radiación UV [2] en los cuales, los tiempos e intensidades de exposición son cuida-

dosamente controlados para evitar el daño permanente en el material. El resultado de este tratamiento es un dispositivo de mucha utilidad en el campo de la fotónica conocidos como rejillas Bragg de fibra óptica; la interferencia del haz de luz provoca una modulación regular en el índice de refracción a lo largo de la guía de onda. Es posible trazar perturbaciones no regulares (apodizado) en la fibra óptica, dando propiedades particulares a los perfiles de reflexión de la rejilla, una cualidad sumamente útil para mejorar el desempeño del filtrado óptico (véase figura 1).

Una de las cualidades ópticas de este dispositivo es su capacidad para filtrar por reflexión, radiación con longitudes de onda específicas λ_B , esta propiedad está directamente relacionada con la separación longitudinal $l_0 = \Lambda$ (parámetro Bragg) [3] y de la modulación periódica del índice de refracción efectivo n_{eff} , según la ecuación (2).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

Lograr el acoplamiento de radiación en la fibra óptica, implica conocer no solamente la longitud de onda electromagnética por transmitir, sino también del modo característico de propagación el cual depende de la constante de propagación de fase β y la constante de propagación de la luz en el vacío k ; bajo estas condiciones, el índice de refracción asume un carácter efectivo y puede representarse como la proporción relativa de estos dos parámetros n_{eff} [4] según la ecuación (3):

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} \quad (3)$$

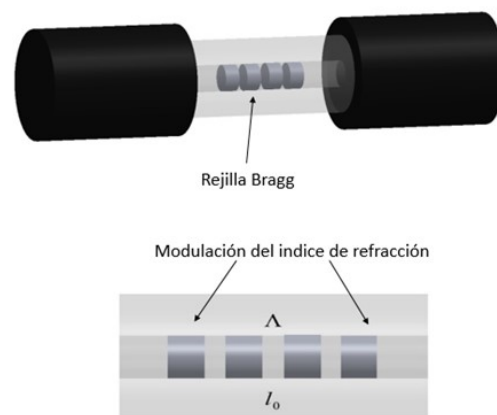


Fig. 1. Perturbación del índice de refracción debido a la incidencia de radiación ultravioleta sobre el núcleo de una fibra óptica.

2. Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm

La modulación impresa en el núcleo de la fibra permite reflejar solo la radiación cuya longitud de onda sea equiparable a la longitud L_g de la rejilla Bragg; la radiación integrada bajo una constante de acoplamiento κ_{ac} , se descompondrá en dos frentes de radiación; uno de ellos es transmitido a lo largo del núcleo y el segundo es reflejado conservando un perfil característico acorde a la modulación del índice de refracción según la ecuación (4); este último perfil es el objetivo principal cuando de supresión espectral se refiere en las pruebas de análisis.

$$\rho = \tanh^2(\kappa_{ac} + L_g) \quad (4)$$

La utilidad de esta técnica de supresión se enfoca en aquellos casos donde se requiere eliminar ciertas longitudes de onda que imposibilitan el estudio de señales débiles obstaculizadas por ruidos de emisiones no deseadas, manteniendo en todo momento una adecuada correspondencia en los perfiles típicos de la reflexión en la rejilla y los perfiles de la emisión por filtrar. En la mayoría de los casos los perfiles de radiación acoplados en los núcleos mantienen formas gaussianas pero no necesariamente estos perfiles se equiparan en su forma a los perfiles que resultan de la reflexión ρ ; para resolver en parte este problema, se puede proceder en dos sentidos: uno de ellos implicaría el diseño cuidadoso de la modulación del índice de refracción efectivo en el núcleo de las rejillas periódicas y el segundo sería implementar un método de sintonización que implique modificar la modulación del índice de refracción. En este trabajo se muestra el resultado de la sintonización de la rejilla Bragg aplicando tensión mecánica, modificando el parámetro Λ para un pico de emisión próximo a los 1550nm.

Los perfiles típicos de la reflexión para rejillas periódicas se describen a través de la ecuación (4) partiendo de las constantes de acoplamiento κ_{ac} y la longitud de la rejilla L_g [5].

Para probar la viabilidad de estos dispositivos en el filtrado de líneas espectrales complejas como las presentadas por las emisiones infrarrojas del radical OH producidas por excitación vibracional, se montó un prototipo formado por una fuente láser a 1548.80 nm cuyo haz fue acoplado al núcleo de una fibra óptica con una rejilla Bragg inscrita en el núcleo y diseñada para trabajar a 1548.85 nm. El objetivo del experimento fue el simular una de las líneas de emisión del OH con un perfil no gaussiano. La variabilidad de las líneas espectrales en algunos casos podría representar una dificultad para su correcto acoplamiento en el núcleo de la fibra, por esta razón, fue necesario sintonizar paulatinamente la posición del pico de máxima intensidad para hacerlo coincidir con el máximo del

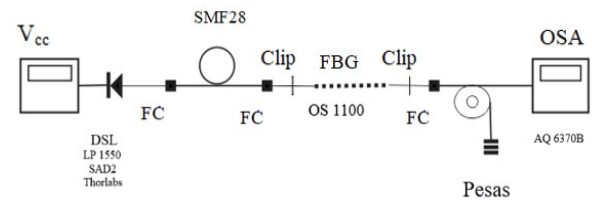


Fig. 2. Setup experimental.

perfil reflejado por la rejilla; en la figura 2 se ilustra esquemáticamente la colocación de las masas de prueba μ , solo como una referencia dentro de la configuración del experimento. La sintonización se logró ejerciendo tensión mecánica mediante cargas de masa previamente seleccionadas, las deformaciones en el interior de la fibra modificaron la separación relativa de las modulaciones en el índice de refracción según la ecuación (5).

El enfrentamiento de los dos perfiles, reflexión y fuente láser, dio como resultado un frente de radiación transmitido y atenuado por efecto de la convolución, que al ser sintonizado con los esfuerzos mecánicos de tensión longitudinal se pudo centrar eficientemente para producir una atenuación del orden de 6.89dB (véase Fig. 3), se puede observar la respuesta en el perfil de transmisión para la configuración entre la rejilla Bragg y la fuente laser conforme se desplaza el máximo de la longitud de onda del perfil reflejado. La imagen corresponde a la carátula del analizador de espectros ópticos Yokogawa AQ6370B, el eje horizontal corresponde a la longitud de onda en nanómetros nm y el eje vertical es la potencia transmitida en miliwatts (mw).

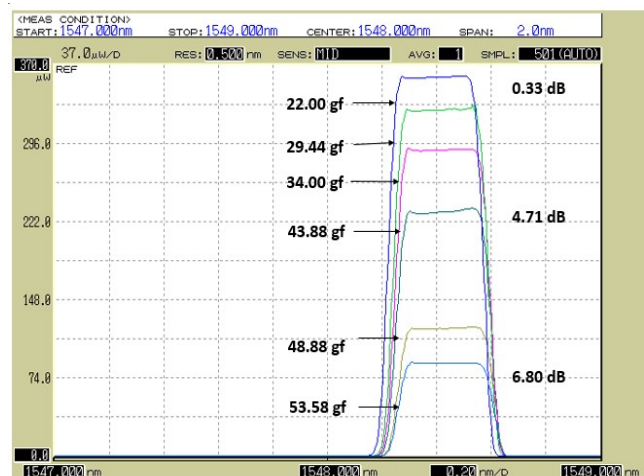


Fig. 3. Acumulación de marcos obtenidos en el analizador de espectros ópticos OSA Yokogawa AQ6370B.

Destaca un comportamiento no lineal de la potencia transmitida, con respecto al periodo de la rejilla. Es importante enfatizar que variando la magnitud del periodo Λ de la rejilla, ya sea por dilatación térmica o deformación longitudinal, se consigue un cambio proporcional a la longitud de onda λ' , a la carga μ y a algunos parámetros físicos de la fibra κ , según la ecuación (5) [6].

$$\rho = \tanh^2(\kappa_{ac} + L_g) \quad (5)$$

Los resultados experimentales muestran ciertas regiones en donde la posibilidad de reflejar eficientemente las líneas estrechas es relativamente baja; tomando en cuenta que el ensanchamiento típico de las líneas de emisión están relacionadas fuertemente con el proceso físico que les da origen, este inconveniente podría ser considerado mediante la simulación previa de perfiles gaussianos [7] similares a los presentados en una fuente láser y compararlos con bandas selectivas que se ajusten lo suficientemente a las líneas reales.

3. Propuesta de un convertidor fotónico por micromaquinado

La viabilidad de esta técnica de filtrado sería mucho más eficiente integrando un número importante de rejillas en un solo dispositivo óptico [8]; para lograr este objetivo se plantea la opción de fusionar mediante adelgazamiento (*taper*), una fibra multimodo con un conjunto de fibras mono modo con sus respectivos filtros integrados en el núcleo, formando el convertidor. En este dispositivo, también conocidos como linterna fotónica [9] (véase Fig. 4), la zona de transición requiere de la longitud adecuada para permitir un adelgazamiento gradual que reduzca al máximo la posibilidad de ruptura. Desde su concepción y su implementación en laboratorio, existen varios desafíos de su fabricación por lo complicado que resulta obtener adelgazamientos uniformes en el empalme de las fibras.

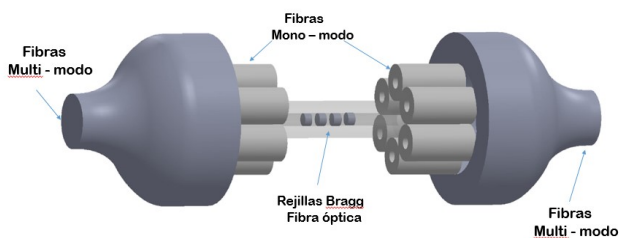


Fig. 4. Linterna fotónica formada por un conjunto de 7 elementos (fibras mono-modo).

Un método comúnmente utilizado para el empalme de fibras consiste en someter a un proceso de calentamiento y estiramiento progresivo al conjunto de fibras colocadas en el interior de un tubo de óxido de silicio con bajo índice de refracción, durante el proceso de formación del *taper*, se presentan irregularidades en el dispositivo que derivan en daños severos en los revestimientos de las fibras, esto se debe a lo difícil que resulta mantener la temperatura adecuada para lograr la flexibilidad del estado viscoso del óxido de silicio en su punto de fusión (véase Fig. 5).

La alternativa es una propuesta que incluye el sistema de sintonización por tensión mecánica y el adelgazamiento de la fibra multi modo previamente procesada; para esto se requiere diseñar el *taper* mediante una técnica de micromaquinado [11]; este método ofrece la ventaja de controlar en todo momento las dimensiones correctas del adelgazamiento a través de la sedimentación por capas de discos diferenciales de óxido de silicio.

En términos generales el diámetro de las fibras ópticas con revestimiento está en el orden de 125 micras, independientemente si se trata de mono-modo o multimodo, esta característica quedan determinadas por los diámetros efectivos de los núcleos, 8-9 micras y 50-100 micras respectivamente. La sección transversal equivalente y su radio R queda en función del número finito de fibras mono modo n ; su magnitud tiene una importancia significativa debido a que este valor, limita el número máximo de fibras monomodo permisibles en el *taper*; a mayor número de fibras la longitud del adelgazamiento tendería a ser mayor dando la pauta a una transición progresiva y suave pero sensiblemente frágil; característica que se hace más notorio cuando se recurre a la técnica de estiramiento por calentamiento en la cual presentan rupturas inesperadas en el momento mismo de la formación del *taper*.

La formación del adelgazamiento por técnicas de micromaquinado [11] permitiría diseñar con una mayor precisión, la longitud de la zona de transición monomodo-multimodo, esto implicaría la integración de un número suficientemente grande de elementos diferenciales con radios R' reducidos progresivamente, con la ventaja de mantener en todo momento, el control del diámetro del cuello adelgazado y su resistencia mecánica a diferencia de la técnica de calentamiento.

El uso de fuentes láser con sistemas de excitación adecuada [12] ayudaría a modelar los perfiles complejos de las líneas espectrales generados en procesos radiativos específicos, lo que sin duda sería un aporte significativo para esta técnica de supresión.

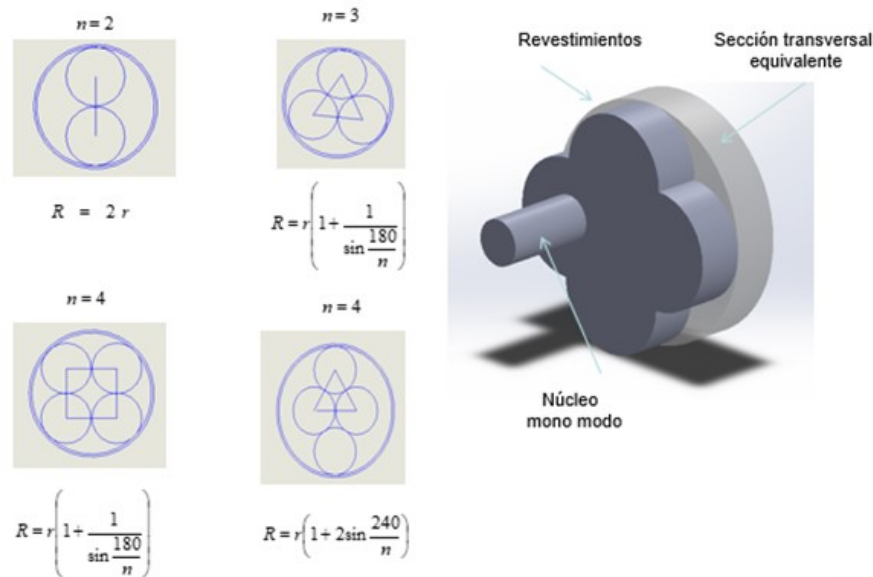


Fig. 5. Linterna fotónica lograda mediante adelgazamiento de un conjunto de fibras mono modo [10].

4. Conclusiones

Con este experimento se pudo demostrar la posibilidad de filtrar líneas espectrales difíciles por sus características de variabilidad mediante la sintonización de una rejilla Bragg de fibra óptica de uso comercial; ampliar el rango de acción de este método conduce inevitablemente a la necesidad de diseñar convertidores de modos mediante el adelgazamiento de fibras ópticas en donde las nuevas técnicas de micromaquinado serían de gran utilidad desde el punto de vista del diseño; no obstante, aún queda por profundizar en el análisis de los inconvenientes técnicos que representa el desafío de construir por sedimentación, discos diferenciales de óxido de silicio que al ser acoplados, puedan tener el mismo desempeño que los *taper* logrados en una fase térmica. El desarrollo tecnológico que implica la manufactura de microelementos ópticos es ampliamente conocido y, sin duda, aún tiene un amplio camino por recorrer, donde áreas importantes como la fotónica tendrán un papel destacado en su desarrollo.

Referencias

- [1] D.Y. Smith, *Dispersion theory, sum rules and their application to the analysis of optical data*, in: *The Handbook of Optical Constants* (Chapter 3). Academic Press, New York,
- [2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, núm. 10, pp. 647-649, 1978.
- [3] G. Pereira, M. McGugan, L. P. Mikkelsen, "FBG_SiMul V1.0: Fibre Bragg grating signal simulation tool for finite element method models," *SoftwareX*, vol. 5, pp. 163-170, 2016.
- [4] J. I. Yamada, M. Saruwatari, K. Asatani, H. Tsuchiya, A. Kawana, K. Sugiyama, T. Kimura, 'High speed optical pulse transmission at 1.29 μm wavelength using low-loss single-mode fibers', *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-14, pp. 791-800, 1978.
- [5] R. Kashyap, *Fiber Bragg grating (Chapter 4)*, Elsevier, 2010.
- [6] R. Benítez, F. Martínez, V. Orlov, "A new method for actively tuning FBGs to particular infrared wavelengths for OH emission lines suppression," *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, pp. 351-361, 2019.
- [7] Y. F. Olvera, V. Kasakov "Algoritmos óptimos y no óptimos de reconstrucción de señales aleatorias gaussianas," *Científica*, vol. 17 núm. 3, julio-septiembre 2013,
- [8] S. C. Ellis, J. Bland-Hawthorn, "The case for OH suppression at near-infrared wavelengths," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 386, núm. 1, pp. 47-64, 2008
- [9] D. Noordegraaf, P. M. W. Skovgaard, M. D. Maack, J. Bland-Hawthorn, R. Haynes, J. Lægsgaard, "Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port photonic lantern," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 4673-4678, 2010.
- [10] I.H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 15, núm. 1, 1965, pp. 1205-1209.
- [11] M. E. Motamedi, "Merging micro-optics with micromechanics: micro-optoelectromechanical (MOEM) devices," *Proc. SPIE 10271, Diffractive and Miniaturized Optics: A Critical Review, 102710G* (28 diciembre 1993).
- [12] J.Y. Montiel, J.M. De la Rosa "Acoplamiento de impedancias para la excitación con RF de un láser de CO_2 ," *Científica*, vol. 9 núm. 4, octubre-diciembre 2005.

