

Fibras ópticas con inhomogeneidad inducida

Norma Patricia Puente Ramírez, Arturo Romero Castañeda
Gustavo Rodríguez Morales y Moisés Hinojosa Rivera
Posgrado en Ingeniería Eléctrica
FIME, UANL
norma.puenterm@uanl.edu.mx

RESUMEN

Por sus características de propagación, direccionalidad y unidimensionalidad, la fibra óptica es considerada uno de los dispositivos más importantes en el área de las comunicaciones. Sin embargo, la transmisión de datos no es el único objetivo en el uso de la fibra óptica. A partir del descubrimiento de la fotosensibilidad se implementaron estructuras en el núcleo, tales como: Rejillas de Bragg o moteado (speckle) con estadística conocida convirtiéndola en uno de los dispositivos fotónicos más importantes. Las propiedades particulares de las rejillas de Bragg han propiciado su uso en diferentes aplicaciones dentro de los sistemas de comunicaciones como son: espejos, sensores, amplificadores, láseres y filtros. Por otro lado, las estructuras desordenadas han contribuido a aumentar la eficiencia de estas aplicaciones, haciendo evidente que hay un potencial tecnológico para los sistemas desordenados que aún no ha sido explotado.

PALABRAS CLAVE

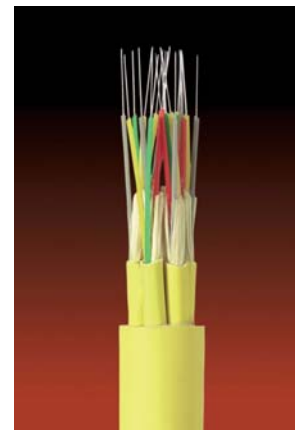
Fibras ópticas, propagación de luz, estructuras internas, rejillas de Bragg, moteado.

ABSTRACT

Due to its propagation characteristics, directionality and dimensionality, the optical fiber is considered one of the most important devices in the area of communications. However, the transmission of data is not the only objective in the use of optical fiber. Since the discovery of photosensitivity internal structures have been implemented within the core of optical fibers, such as Bragg gratings or mottled (speckle) with known statistical making it one of the most important photonic devices. The particular properties of Bragg gratings have led to its use in various applications in communications systems such as mirrors, sensors, amplifiers, lasers and filters. On the other hand, disordered structures have contributed to increase the efficiency of these applications, making clear that there is a technological potential for disordered systems, which has not yet been properly exploited.

KEYWORDS

Optical fiber, light propagation, internal structures, Bragg gratings, speckle.



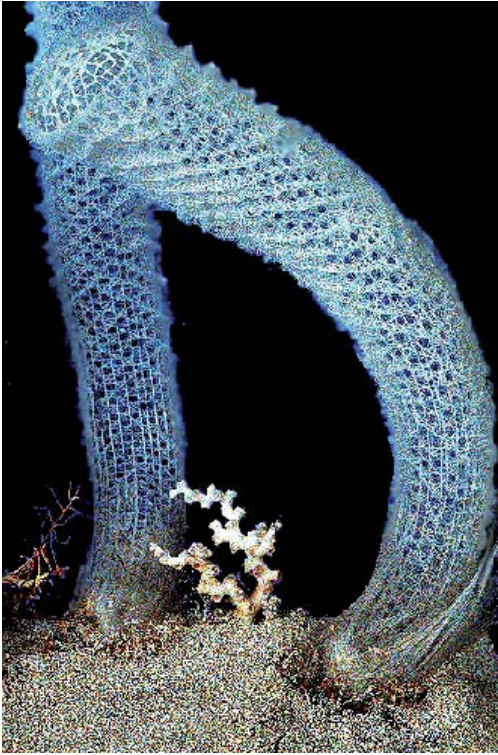


Fig. 1. Esponja marina con propiedades de luz similares a la fibra óptica: euplectella.^{1,2}

INTRODUCCIÓN

La fibra óptica ha revolucionado el campo de las telecomunicaciones al convertirse en un dispositivo imprescindible en la implementación de redes de comunicación óptica. Sin embargo, la transmisión de datos no es el único objetivo en el uso de la fibra óptica. En los últimos años, se han implementado dispositivos fotónicos a partir de inducir estructuras o inhomogeneidades en el núcleo de las fibras ópticas. Por inhomogeneidad entendemos la variación longitudinal y transversal del índice de refracción a lo largo de la fibra óptica.

Sin embargo, la fibra óptica no es una idea original del todo, la naturaleza una vez más nos demuestra su protagonismo creativo al estar un paso adelante con la creación de la Euplectella² (figura 1).

Debido a las condiciones naturales de iluminación que gobiernan a la Euplectella, ésta es capaz de funcionar eficientemente como guía de onda monomodo o multimodo, sin embargo el material del cual está compuesta no presenta una total transparencia y las pérdidas de luz suelen ser considerables.

En el caso de las fibras ópticas, un parámetro de gran importancia para la transmisión de luz, son las pérdidas por atenuación, las cuales pueden ser debido a impurezas, composición del núcleo o imperfecciones.

Las imperfecciones en el núcleo de la fibra óptica pueden ser generadas por fabricación o inducidas de manera controlada, las generadas por fabricación se presentan debido a irregularidades en la geometría del núcleo o al material contaminado, mientras que las imperfecciones de manera controlada pueden ser inducidas utilizando el efecto de la fotosensibilidad.³ El descubrimiento de la fotosensibilidad abrió la posibilidad de modificar el índice refractivo en el núcleo de las fibras ópticas de forma periódica, aperiódica o aleatoria, a estas modificaciones se les conoce como Rejillas de Bragg. En la búsqueda de nuevas estructuras internas, también se ha reportado la implementación de inhomogeneidad inducida en el núcleo de la fibra óptica y sorpresivamente estas variaciones inhomogéneas han contribuido de manera positiva aumentando la eficiencia de las aplicaciones ya documentadas utilizando rejillas de Bragg.

En este trabajo se presenta el estado del arte de las estructuras inducidas por fotosensibilidad en el núcleo de fibras ópticas. Para lograr este objetivo, se presentan los principales parámetros que permiten la propagación de la luz en fibras ópticas, se mencionan los materiales más utilizados para su fabricación y se describen las diferentes estructuras que se han implementado debido al descubrimiento de la fotosensibilidad. Los beneficios y aplicaciones que surgen de la implementación de estructuras inducidas en las fibras ópticas son descritos y finalmente se exponen las conclusiones.

Parámetros de guiado en fibras ópticas

Una fibra óptica⁴ es una guía de onda comúnmente cilíndrica fabricada de materiales de baja absorción, tal como la sílica. Está formada por un núcleo central, envuelto por un revestimiento con índice de refracción menor (figura 2).

La luz es contenida en la fibra óptica por el fenómeno de reflexión total interna, el cual ocurre cuando inciden ondas en una frontera formada por dos materiales con diferente índice de refracción.

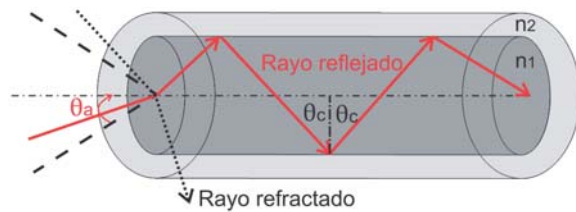


Fig. 2. Reflexión total interna y ángulo crítico en una fibra óptica.

La condición se cumple siempre que el índice de refracción del material en el que viaja la luz inicialmente sea mayor (n_1) que el índice de refracción del material al que pasará cruzando la frontera (n_2), como se ilustra en la figura 2.

Partiendo de la ley de Snell,

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2, \quad (1)$$

se obtiene una relación entre el ángulo crítico ($2c$) y los índices de refracción del núcleo (n_1) y el revestimiento (n_2), quedando como sigue:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Otro parámetro utilizado en los sistemas ópticos para indicar el rango de ángulos a los cuales el sistema admite o emite luz es la apertura numérica y se calcula con la siguiente ecuación:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \text{sen} \theta_a. \quad (3)$$

Existen diversas formas de clasificar las fibras ópticas, en este escrito se presenta una clasificación basada en los modos de propagación y el perfil del índice de refracción (ver figura 3), como a continuación se mencionan:

- a) Fibras ópticas monomodo con perfil escalón.
- b) Fibras ópticas multimodo con perfil escalón.
- c) Fibras ópticas multimodo con perfil gradual.

Materiales de fabricación en fibras ópticas

Inicialmente la fibra óptica resultaba un medio con altas pérdidas que no favorecía la transmisión de datos, sin embargo en la década de los 70's la compañía Corning Glass Works patentó un material ultratransparente⁵ capaz de convertir a la fibra óptica en un conductor eficiente de luz.

Actualmente los principales materiales de fabricación para fibras ópticas son el dióxido de silicio (sílica) y el polimetacrilato de metilo, el cual es un polímero.

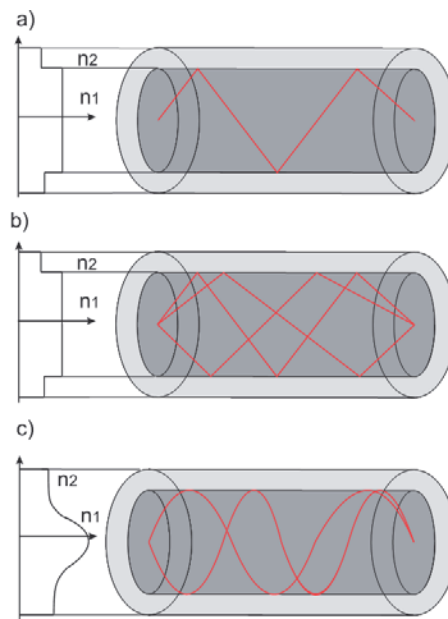


Fig. 3. Perfil de índice de refracción de una fibra: a) monomodo perfil escalón, b) multimodo perfil escalón y c) multimodo perfil gradual.

La introducción de polímeros en la fabricación de fibras ópticas proporciona una gran cantidad de ventajas, entre las cuales están: disminuir las fracturas por mal manejo y la biocompatibilidad para aplicaciones médicas.

Hoy en día las fibras ópticas se manufacturan en 3 tipos de configuraciones:

- Núcleo de sílica y revestimiento de plástico (SCP).
- Núcleo de plástico y revestimiento de plástico (PCP).
- Núcleo y revestimiento de sílica (SCS).

INHOMOGENEIDADES EN EL NÚCLEO DE FIBRAS ÓPTICAS

Inducir estructuras o inhomogeneidades en el núcleo de la fibra óptica, ha sido hasta el día de hoy un campo fértil para la implementación de dispositivos intrínsecos en la fibra óptica. El origen de estas estructuras o inhomogeneidades inducidas se remonta al descubrimiento de la fotosensibilidad.

Fotosensibilidad

La fotosensibilidad es producto de los experimentos realizados con fibra de sílica dopada con germanio.³

El experimento consistía en introducir un haz láser UV a través de la fibra y esperar unos minutos a observar los resultados. Con el paso del tiempo la luz que se transmitía hacia el otro extremo de la fibra era cada vez menor, según la ley de la conservación de la energía, esa luz debía de estar en alguna parte, y las opciones eran que se había absorbido durante el proceso, se había refractado y atenuado o se había estado reflejando progresivamente hacia la fuente. Según observaciones realizadas por Hill *et al.*³ la luz coherente propagada a través de la fibra interfería con una pequeña cantidad de luz reflejada hacia la fuente, implementando un patrón de onda estacionaria, el cual a través de la fotosensibilidad grabó una rejilla en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. El incremento en la fuerza de la rejilla a causa de la prolongada exposición a la luz UV, resultaba proporcionalmente en un incremento en la intensidad de la luz reflejada hacia la fuente hasta llegar a un punto de saturación de casi el 100%. El incremento en la luz reflejada hacia la fuente es una propiedad atribuida en un principio al germanio y se le conoce como fotosensibilidad.

Actualmente el fenómeno de la fotosensibilidad se puede encontrar en una gran variedad de materiales, por ejemplo:

- Boro: Presenta características que disminuyen el índice de refracción.
- Germanio: Este material es utilizado para incrementar el índice de refracción y también fue el primer material en el cual se presentó el efecto de la fotosensibilidad.
- Erblio: Usado como elemento activo en los amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA).

Rejillas de Bragg

Las rejillas de Bragg⁶ son modificaciones del índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica (figura 4), poseen las características propias de un espejo y son de fácil fabricación utilizando radiación UV y fibras dopadas con material fotosensible.

La luz que se propaga a lo largo del núcleo de la fibra óptica, será esparcida por cada una de las interfaces que componen a la rejilla de Bragg, produciendo un efecto que semeja el funcionamiento

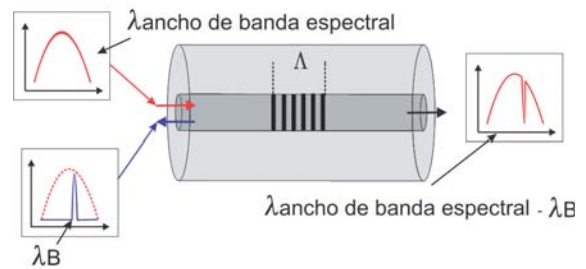


Fig. 4. Representación gráfica de una rejilla de Bragg en el núcleo de una fibra óptica.

de un espejo. Una de las principales características de la luz reflejada es que satisfacen la “condición de Bragg”, la cual está descrita como:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \tag{4}$$

donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, Λ es el período de la rejilla y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica. La condición de Bragg es un parámetro esencial en el diseño e implementación de sensores, láseres y filtros, más adelante se describen ampliamente.

Técnicas de fabricación

Las técnicas externas caen en dos categorías que son: interferométricas y no interferométricas. A continuación se describen:

Interferométricas

Esta técnica está diseñada para confinar el patrón de interferencia al plano de la fibra, la luz láser se divide en dos haces con intensidades iguales y que viajan a lo largo del interferómetro por caminos diferentes para intersectarse en el núcleo de la fibra óptica como se presenta en la figura 5.

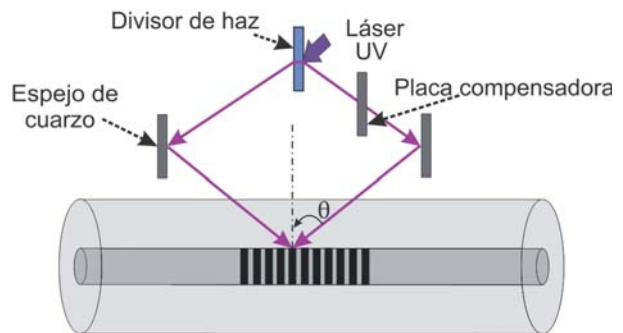


Fig. 5. Técnica basada en interferometría para fabricar rejillas de Bragg en el núcleo de fibras ópticas.

La periodicidad de la rejilla (Λ) depende de dos factores: 1) la longitud de onda del haz láser UV y 2) el ángulo entre los haces que interfieren, dicha relación está dada en la siguiente ecuación:

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

donde λ_w es la longitud de onda del haz incidente y está limitada a la región de fotosensibilidad del ultravioleta y θ es el ángulo entre haces.

No interferométricas

La técnica de la mascarilla de fase es usada para imprimir un patrón de interferencia en una fibra fotosensible (ver figura 6). La mayoría de las mascarillas son fabricadas de sílica pura transparente a la luz UV. El principio de operación se basa en la difracción de la luz, el patrón de interferencia producido cubre la fibra, alternando regiones de alta y baja intensidad. En las regiones de alta intensidad, la luz UV rompe los enlaces de la sílica cambiando su índice de refracción y de esta manera se forma la rejilla.⁶

Por lo general el período Λ_{pm} de la rejilla grabado en la mascarilla de fase está determinado por el fabricante.

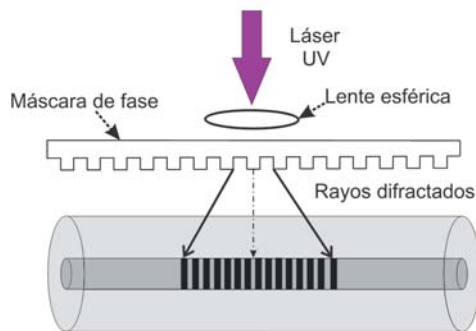


Fig. 6. Técnica basada en mascarilla de fase para fabricar rejillas de Bragg en el núcleo de fibras ópticas.

Tipos de rejillas de Bragg

Las rejillas de Bragg están clasificadas de acuerdo a la geometría en los siguientes tipos:

1. Periódicas: Este tipo de rejillas presentan una periodicidad en su distribución a lo largo de la fibra como se muestra en la figura 7a. Lo que se traduce como un cambio en el índice de refracción y un período de la rejilla Λ constante.

2. Aperiódicas: Son aquellas rejillas de Bragg que presentan un cambio aperiódico en el índice de refracción, se les conoce también como rejillas de Bragg “chirp”, una muestra se presenta en la figura 7b. Este tipo de configuración permite tener distintos períodos de Bragg Λ a lo largo de la fibra. Son aplicables en sistemas de comunicación de alta velocidad que transmiten a largas distancia. Son eficientes como compensadores de dispersión.⁷⁻⁸

3. Inclinas: Son rejillas que presentan una inclinación con respecto al eje de propagación de la fibra óptica, como se muestra en la figura 7c. El propósito de esta inclinación es acoplar la luz hacia modos de propagación en el revestimiento, también llamados modos radiativos, los cuales están presentes en la parte exterior del núcleo de la fibra. Una de sus principales características es la cantidad de atenuación por unidad de distancia, la cual comparada con el núcleo es mucho mayor.⁷⁻⁹

4. Superestructuras: Estas rejillas presentan una configuración específica como se presenta en la figura 7d. Un ejemplo de este tipo de rejillas es la documentada por Zhang *et al.*¹⁰, en donde el patrón de las rejillas obedece al modelo matemático de la serie de Fibonacci y el cual fue impreso utilizando el método de mascarilla de fase. La característica más importante es que la reflectividad de las rejillas obedece la propiedad de seis ciclos que se presenta en la serie de Fibonacci. Comparadas con estructuras periódicas, este tipo de configuración permite ajustar una mayor cantidad de parámetros y por lo tanto abre una amplia gama de aplicaciones como por ejemplo: interruptores ópticos, filtros de banda estrecha con multiplexación por división en longitud de ondas densas y dispositivos ópticos activos de multifrecuencia.

5. Aleatorias: Fueron por primera vez reportadas en 2008 por N. Lizarraga *et al.*¹¹. Son rejillas con un período bien definido, la aleatoriedad es inducida en la distancia de separación de cada una de las rejillas como se presenta en la figura 7e. Como resultado de la aleatoriedad se obtiene un láser aleatorio unidimensional en el núcleo de la fibra óptica co-dopada de erbio/germanio.

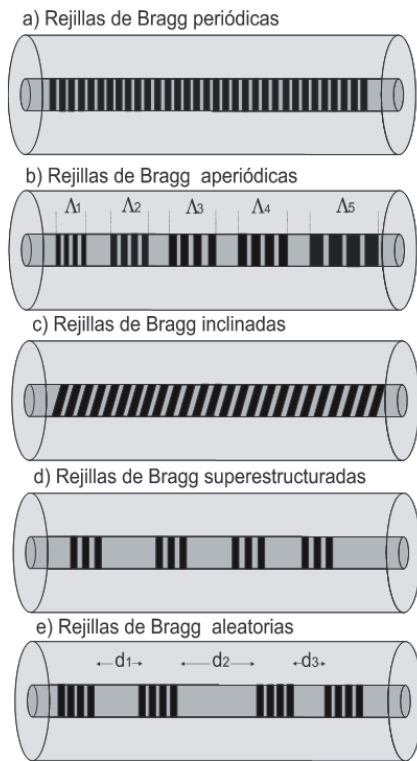


Fig. 7. Tipos de rejillas de Bragg.

Inducción de la inhomogeneidad

En recientes años, ha aumentado el interés por el estudio de los medios inhomogéneos.¹³⁻¹⁴ Estos sistemas presentan algunas ventajas en comparación con los sistemas homogéneos. En un sistema homogéneo el esparcimiento por imperfecciones, polvo o cualquier variación geométrica es un factor que se desea reducir o suprimir, ya que causa atenuación de la señal transmitida. Sin embargo, en los sistemas inhomogéneos el esparcimiento es un factor positivo si se utiliza correctamente.

Los beneficios de inducir un medio inhomogéneo en sistemas periódicos u homogéneos se han reportado en diferentes áreas de investigación, como lo son: comunicaciones inalámbricas,¹² óptica no lineal,¹³ neurobiología¹⁴ y en la implementación de microláseres utilizando medios desordenados.¹⁵ En 2003,¹⁶ reportan la implementación de un láser, debido al esparcimiento de partículas desordenadas sin utilizar espejos.

En 2011, N. P. Puente *et al.*¹⁷, reportan estadísticas de transmisión como resultado de inducir variaciones en el índice de refracción del núcleo de la fibra

óptica. Las variaciones se realizaron debido a la fotosensibilidad de las fibras dopadas con Ge y a imprimir transversalmente un patrón de speckle* (fig. 8a), utilizando el esquema experimental de la figura 8b.

El tamaño de la inhomogeneidad está relacionado directamente con la distancia del difusor a la fibra óptica, la longitud de onda ($\lambda_{inc}=244$ nm) y el ancho del haz que incide en el difusor. Mediante el control del tamaño de la inhomogeneidad es posible modificar la luz transmitida, controlar la supresión de pérdidas de radiación y mejorar el acoplamiento entre los modos, esto hace de la fibra óptica con inhomogeneidad inducida un medio óptimo para la implementación de láseres aleatorios.

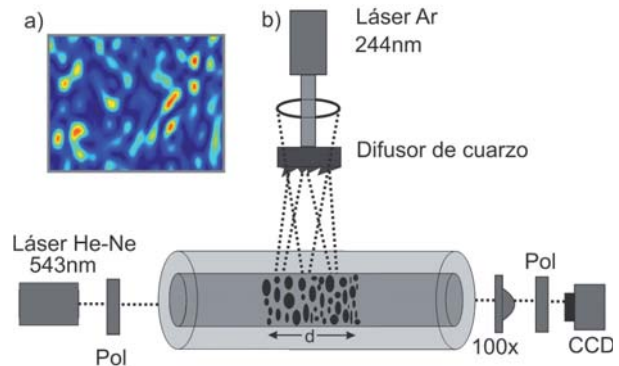


Fig. 8. a) Patrón de speckle y b) Esquema experimental.

APLICACIONES Y PERSPECTIVAS

A partir del descubrimiento de la fotosensibilidad, la extraordinaria evolución de las variaciones en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica continúa siendo un gran tópico de interés. Es por ello que en la última década, surgen nuevas propuestas para la implementación y aplicación en diversos sistemas ópticos.

La propiedad de reflejar una o varias longitudes de onda, le permite a las estructuras inducidas en el núcleo de la fibra óptica (Rejillas de Bragg) adoptar el rol de dispositivos de sensado. Entre las variables medibles están: presión, volumen, temperatura,¹⁸ esfuerzo mecánico,¹⁸ aceleración,¹⁹ composición química, radiación, rotación, etc.

Otra aplicación se ha realizado en la implementación de estructuras inteligentes,²⁰ donde el sensado es capaz de detectar a tiempo fracturas

y daños estructurales en puentes y edificios, previniendo de esta manera derrumbes o colapsos. En el caso de aeronaves (figura 9) y barcos tripulados el sensado es de vital importancia para salvaguardar vidas humanas ya que al detectar posibles fugas de combustible se puede evitar una potencial catástrofe.



Fig. 9. Aeronave moderna.²¹

La implementación de inhomogeneidades aleatorias en el núcleo de fibras ópticas, ha resultado en el aumento de la sensibilidad en sensores, disminución del ancho de banda espectral de láseres e implementación de láseres aleatorios, generando un amplio campo de investigación en la implementación de dispositivos fotónicos intrínsecos.

CONCLUSIONES

El reciente auge en los sistemas de comunicaciones de alta velocidad se debe en gran parte al uso de la fibra óptica, su gran capacidad de información y su inmunidad a la interferencia electromagnética son solo algunas de las ventajas por las cuales la fibra óptica es uno de los dispositivos más usados e importantes en las telecomunicaciones alrededor del mundo. Sin embargo, un error recurrente es relacionar a la fibra óptica únicamente como un medio de transmisión, en los últimos años este concepto ha quedado obsoleto debido a la implementación de estructuras internas en el núcleo de la fibra óptica, abriendo una nueva y amplia gama de aplicaciones tales como: filtros, espejos, sensores, multiplexores y láseres. Los recientes avances en el área de sistemas desordenados señalan que las estructuras desordenadas en el núcleo de las

fibras ópticas han contribuido de manera positiva a aumentar la eficiencia de estas aplicaciones, reiterando el potencial tecnológico e inexplorado de los sistemas desordenados, exponiendo un sin número de beneficios potenciales para el hombre.

REFERENCIAS

1. Venus Flower Basket , <http://www.abdn.ac.uk/~nhi708/treasures/venus.php>
2. Aizenberg, J., Weaver, J.C., Thanawala, M.S., Sundar, V.C., Morse, D.E., Fratzl, P., Skeleton of Euplectella sp.:Structural Hierarchy form the Nanoscale to the Macroscale, *Science*, 309, 275-278, (2005).
3. Hill, K.O., Meltz, G., Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview, *IEEE Xplore: Journal of Lightwave Technology*, 15, 1263-1276, (1997).
4. DeCausatis, C., DeCausatis, C.J., *Fiber Optic Essentials*, Elsevier (2006).
5. Corning Glass Works, Fused silica optical waveguide, MAURER, Robert, D., US, *Int Cl. G02b5/14*, no. 3,659,615, (1972).
6. Kashyap, R., *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, (2010).
7. Othonos, A., Fiber Bragg gratings, *Review of Scientific Instruments*, 68, 4309-4341, (1997).
8. Durkin, M.K., Zervas, M.N., Laming, R.I., Quality Considerations of Chirped Fibre Bragg Gratings For Dispersion Compensation in WDM Systems, *Optoelectronics Research Centre, University of Southampton*, (1998).
9. Erdogan, T., Sipe, J.E., Tilted fiber phase gratings, *Journal Optical Society of America*, 13, 296-313, (1996).
10. Zhang, J., Li, A., Li, Chuanannan, Xia, Li, Shum, P., The Design and Fabrication of Fibonacci Quasi-periodic Superstructure Fiber Bragg Gratings, *IEEE, Photonics and Optoelectronics Symposium*, (2010).
11. Lizárraga, N., Puente, N.P., Chaikina, E.I., Leskova, T.A., Méndez, E.R., Single mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback, *Optics Express*, 17, 395-403, (2009).

12. Simon, S.H., Moustakas, A.L., Stoytchev, M., Safar, H., Communication in a disorder world, *Physics Today*, 54, 38-43, (2001).
13. Skipetrov, S.E., Disorder is the new order, *Nature*, 432, 285-286, (2004).
14. Price, D.L., New order from neurological disorders, *Nature*, 399, (1999).
15. Cao, H., Xu, J.Y., Seelig, E.W., Chang, R.P.H, Microlaser made of disordered media, *Applied Physics Lett.*, 76, 2997-2999, (2000).
16. Burin, A.L, Cao, H., Ratner, M.A., Understanding and control of random lasing, *Physica B*, 338, 212-214, (2003).
17. Puente, N.P., Chaikina, E.I., Herath, S., Yamilov, A., Fabrication, characterization, and theoretical analysis of controlled disorder in the core of optical fibers, *Applied Optics*, 50 Issue 6, 802-810, (2011).
18. Bahtia, V., Applications of long period gratings to single and multi-parameter sensing, *Optics Express*, 4, 457-466, (1999).
19. Long, Li, Multi-Axis Fiber Bragg Grating Accelerometer, Dalhousie University, Halifax Nova Scotia, (2010).
20. Selvarajan, A., and Asundi, A., Photonics, fiber optic sensor and their application in smart structures, *Journal of Non-Destructive Evaluation*, 15(2), (1995).
21. Jet F-15 <http://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/F-15ACTIVE/index.html>



EL INSTITUTO MEXICANO DE ACÚSTICA
LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Y EL COLEGIO DE INGENIEROS EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
Invitan al
XIX CONGRESO INTERNACIONAL MEXICANO DE ACÚSTICA
CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO
5 - 7 diciembre, 2012

CONFERENCIAS, POSTERS, CURSOS, EXPOSICIÓN

TEMÁTICAS: Audio, Acústica Arquitectónica, Música, MIDI, Acústica Física, DSP, Ruido, Vibraciones Mecánicas, Bioacústica, Comunicaciones, Normas, Etc.

INSTITUCIONES PARTICIPANTES: Acoustical Society of America, Asociación Mexicana de Ingenieros y Técnicos en Radiodifusión, Cámara de la Industria de la Construcción, Del. Oaxaca, Cenidet, Centro Nacional de Metrología, CIIDIR Oaxaca, Instituto Guerrerense de la Cultura, Instituto Politécnico Nacional, Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Tecnológico de Veracruz, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Guadalajara, Universidad de Guanajuato, Universidad de las Américas en Puebla, Universidad Latina de América, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales (Chile).

**SEDE: Centro de Convenciones del Hotel Casa Inn, Río Lerma #237,
Ciudad de México, México.**

INFORMACIÓN

Coordinación General: M.Sc. Sergio Beristáin: sberista@hotmail.com
TEL. (52 - 55) 5682 - 2830, 5682 - 5525, FAX (52 - 55) 5523 - 4742
Coordinación ESIME: Ing. Patricia Ramírez. TEL. (0155)-5729 6000 x 54652
Coordinación CICE: Dr. Jorge A. Maciel. (0155)-5729 6000 x 64632