Resultados más recientes en I+D de Sensores Fotónicos del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria

J. M. López-Higuera, J. L. Arce-Diego, A. Cobo, M. A. Morante, M. Lomer, J. Echevarría, F.J. Madruga, M. A. Quintela, C. Jaúregui, D. Pereda, A. Quintela
Grupo de Ingeniería Fotónica - Dpto. TEISA – E.T.S.I.I. y Telecomunicación
Universidad de Cantabria - Santander E-39005
Tfno: 942-201498, fax: 942-201873, e-mail: higuera@teisa.unican.es

Área de interés: Sensores: Aplicaciones
Palabras clave: sensores fotónicos, sensores ópticos,

1.- Introducción

El Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria, creado por José Miguel López Higuera en 1992, cuenta en la actualidad con 6 Profesores Doctores en ingeniería así como varios Doctorandos y Becarios. Desde el comienzo hasta la actualidad, su línea de investigación se ha centrado en la tecnología óptica de sensado. Dado que estos sistemas sensores pueden dividirse en tres partes fundamentales (transductor óptico, canal y unidad optoelectrónica [1]), se ha creído conveniente enfocar este artículo en los principales resultados obtenidos recientemente en cada una de estas áreas, así como los referidos a los sistemas sensores y a las redes de sensores. En las próximas secciones, se destacarán las contribuciones realizadas sobre nuevos efectos y estudios, dispositivos ópticos, instrumentación optoelectrónica, sistemas y estructuras inteligentes relacionados con la tecnología fotónica de sensado. Los resultados expuestos han sido obtenidos en el marco de proyectos de investigación financiados por la Unión Europea, el Gobierno Español a través de la C.I.C.Y.T., así como por instituciones y empresas privadas.

2.- Nuevos efectos y estudios

Si se pretende que la tecnología óptica pueda ser usada en aplicaciones reales, y penetrar en los mercados, es imprescindible ofrecer dispositivos de bajo coste con las características técnicas requeridas. Con este objetivo se han enfocado los estudios y nuevos efectos para el sensado que se describen a continuación.

2.a.-Tallos de fibra óptica como elemento sensor de magnitudes mecánicas

Uno de los primeros estudios llevados a cabo ha demostrado la posibilidad de usar un simple tallo en voladizo de fibra óptica sin masa en el extremo como elemento clave en la medida de aceleraciones de baja frecuencia. Con ello, se simplifica enormemente la fabricación de transductores, a la vez que se mejora la precisión de los mismos. Los resultados teóricos han sido simulados y validados experimentalmente con varias configuraciones sensoras, encontrándose una gran correlación [2], [3]. Adicionalmente, y a partir del estudio teórico, se ha desarrollado una nueva técnica gráfica que permite interrelacionar los parámetros mecánicos de los tallos de fibra, facilitando el diseño optimizado de transductores basados en este principio [4]. Una muestra del ábaco desarrollado se presenta en la figura 1.

Por otro lado, dado que el tallo de fibra óptica va a estar sometido a vibración continuada durante la vida útil del transductor, y que el tiempo de vida es un factor primordial en aplicaciones reales, se han abordado de forma teórica y experimental sus aspectos de fiabilidad. Un experimento de vibración forzada de forma continua durante más de mil horas ha demostrado la resistencia mecánica de los tallos, mientras que un análisis del esfuerzo soportado por los mismos, así como un segundo experimento de radio mínimo de curvatura, han demostrado la existencia de fatiga en unos niveles que garantizan muchos años de continuo funcionamiento. Este extremo ha sido verificado mediante pruebas en campo de acelerómetros basados en tallos de fibra [3], [5].

2.b.-Nueva función de acoplo de luz entre fibras ópticas multimodo

Un amplio rango de transductores extrínsecos de fibra óptica se basan en el acoplo de luz entre las fibras, siendo muy importante su conocimiento preciso de cara a su diseño y simulación. Los experimentos sistemáticos realizados en el laboratorio han demostrado un cierta discordancia con los resultados ofrecidos por los modelos disponibles, tales como los de iluminación uniforme, uni-angular así como el más reciente propuesto por He y Cuomo [6]. Por este motivo, se ha desarrollado un nuevo modelo,

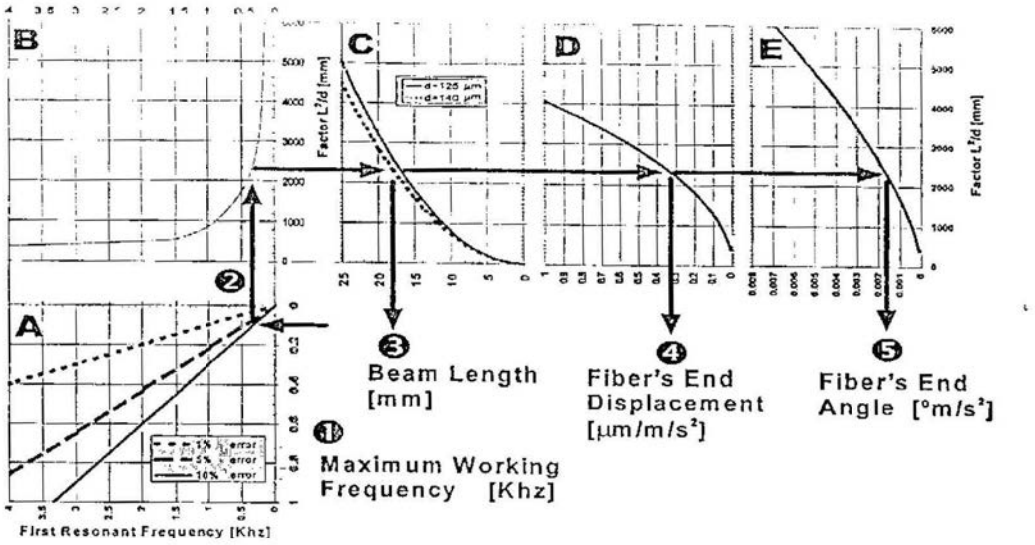

Figura 1: Ábaco para el diseño y análisis de acelerómetros basados en tallos de fibra óptica.

basado en óptica geométrica, que reproduce con mucha más exactitud los resultados experimentales. El modelo es de especial interés en el desarrollo de sensores extrínsecos de fibra óptica [7], [8].

2.c.-Métodos matriciales sistemáticos para el análisis de propagación óptica

Con el objetivo de ser aplicada en estudios teóricos de dispositivos y circuitos fotónicos, se ha desarrollado una teoría matricial unificada que permite un análisis sistemático de los mismos [9]. Esta teoría ha sido aplicada a la determinación de la respuesta espectral de filtros ópticos basados en polarización formados por resonadores birrefringentes de Fabry-Perot concatenados [10], así como filtros todo-fibra de *Lyot-Ohman*, *Solc-fan* o *Solc-folded*. Igualmente, ha sido aplicada a la determinación de los efectos de la polarización en interferómetros de fibra óptica [11].

2.d.-Efectos birrefringentes en dispositivos y circuitos ópticos

Así mismo, se han realizado trabajos para estudiar la evolución del estado de polarización en diferentes dispositivos y circuitos, por ejemplo, en diversas topologías de sensores ópticos de corriente eléctrica.

En este sentido, se ha trabajado en el estudio de los efectos provocados en el estado de polarización debido a imperfecciones en espejos rotadores de Faraday (FRMs). Así, se ha demostrado teórica y experimentalmente la dependencia del ángulo de rotación de espejos rotadores reales con la temperatura, así como su efecto en el estado de polarización en el haz reflejado [12], [13]. Estos trabajos han sido aplicados igualmente a la determinación teórica y experimental de los límites de visibilidad en interferómetros de Michelson de fibra óptica insensibles a la polarización (utilizando técnicas de compensación de la birrefringencia mediante FRMs) [14].

La utilización de espejos rotadores de Faraday junto con fibra óptica de baja birrefringencia ha propuesta como una técnica de compensación en el sensado de corriente. Utilizando una arquitectura como la mostrada en la figura 2, se ha estudiado igualmente de forma teórica y mediante simulación el comportamiento en con dos tipos de fibra óptica, fibra *low-bi twisted* y *spun hi-bi e-core*, encontrándose una baja dependencia de la medida realizado con las características de birrefringencia de la fibra óptica utilizada [15].

Por otro lado, y con aplicación en la medida del campo magnético, se ha estudiado la influencia de la birrefringencia lineal intrínseca y de las perturbaciones recíprocas exterans en el rango espectral libre (FSR) de un interferómetro de Fabry-Perot en fibra. Se han considerado dos configuraciones reflectivas, basadas respectivamente en espejos convencionales y en espejos rotadores de Faraday, encontrándose una apreciable mejora respecto a la configuración transmisiva [16].

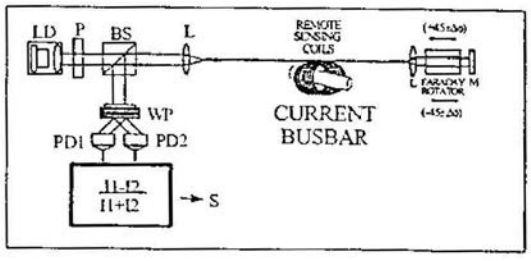

Figura 2: Sensor de corriente.

2.e.-Efectos espectrales en un interferómetro de Sagnac debidos a perturbaciones

El método matricial anteriormente comentado ha sido aplicado igualmente a la determinación de efectos espectrales en interferómetros de Sagnac sometidos a perturbaciones, concretamente, al comportamiento del espectro de frecuencias propias debido a los efectos acumulados del campo magnético, la birrefringencia lineal y circular, a la rotación. Con el estudio llevado a cabo, es posible cuantificar los desplazamientos y desdoblamientos frecuenciales en función de las perturbaciones, y por tanto, eliminar las correspondientes sensibilidad cruzadas [17].

2.f.-Efecto de la no-linealidad de las fuentes láser sobre la espectroscopía derivativa para el sensado de gases

La espectroscopía derivativa es un caso particular de la espectroscopía de absorción, en la cual las señales detectadas, que dan idea de la concentración del gas, son obtenidas a partir de la primera o segunda derivada de la línea de absorción. Sin embargo, la característica corriente-potencia óptica de la fuente presenta un pequeño grado de no-linealidad, influyendo decisivamente sobre la señal recuperada. En este sentido, y en colaboración con el Prof. B. Culshaw de la Universidad de Strathclyde (Reino Unido), se ha estudiado la influencia de esta no-linealidad en el sensado de gases mediante espectroscopía derivativa. Concretamente, se ha realizado un estudio teórico que ha permitido determinar el tratamiento digital de la señal necesario para eliminar este efecto indeseado, y que ha sido aplicado a celdas sensoras de gas metano en el marco de un proyecto LINK del Reino Unido [18].

2.g.-Otros efectos para el sensado

Otros trabajos realizados se han centrado en la utilización de fibras dopadas con tierras raras y en el estudio de dispositivos de microondas controlados por luz, ambos con aplicación en tecnología de sensado. En el primero de los casos, los estudios se han centrado en determinar la influencia de la temperatura en la ganancia de amplificadores ópticos basados en fibras dopadas con Erbio, y han sido validados experimentalmente [19]. Por otro lado, se ha estudiado, tanto de forma teórica como experimental, la fotorespuesta de transistores MESFET de AsGa tanto en DC como en RF [20], [21].

3.- Transductores ópticos

Se detallan a continuación contribuciones realizadas por el G.I.F. referidas al desarrollo de transductores ópticos, siempre atendiendo a criterios de simplicidad y bajo coste, para facilitar su aplicabilidad industrial.

3.a.-Transductores de fibra óptica para magnitudes mecánicas

Otros trabajos realizados se han centrado en el desarrollo de transductores ópticos para la medida de magnitudes tales como la posición, el desplazamiento o la aceleración, basados tanto en modulación de intensidad como espectrométrica.

Basado en el primero de los principios, se han llevado a cabo estudios de diferentes arquitecturas con fibras receptoras trabajando en modo diferencial [3], utilizando configuraciones de dos, tres y cuatro fibras para la medida tanto uniaxial como bidimensional. Se ha volcado un gran esfuerzo, concretamente, en el desarrollo de acelerómetros uniaxiales que utilizan dos fibras receptoras, que han sido diseñados utilizando programas a medida [5] que incluyen los estudios teóricos ya comentados. Igualmente, se han construido diferentes prototipos tanto en tecnología de fibra [22] como de óptica integrada ,estos últimos fabricados en las instalaciones de Cea-LETI [23]. Así mismo, una arquitectura similar pero empleando cuatro fibras receptoras ha servido para la realización de medidores de desplazamiento y acelerómetros con capacidad de medida bi-axial [24], [25], [26].

Por otro lado, la combinación de un tallo de fibra óptica y una red de difracción ha servido para el desarrollo de acelerómetros espectrométricos, cuya arquitectura se muestra en la figura 3, y que permiten realizar una medida compensada ante perturbaciones [27], [28].

Asimismo, se han diseñado, fabricado, caracterizado y embutido en materiales compuestos transductores basados en redes de difracción de fibra óptica de periodo corto (Fig. 4).

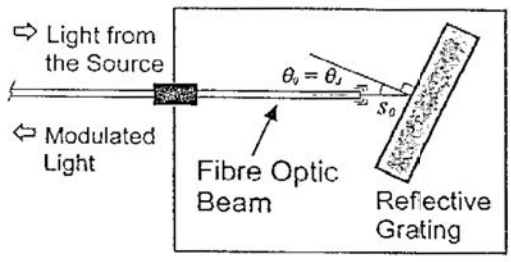

Figura 3: Acelerómetro basado en tallo de fibra óptica y red de difracción.

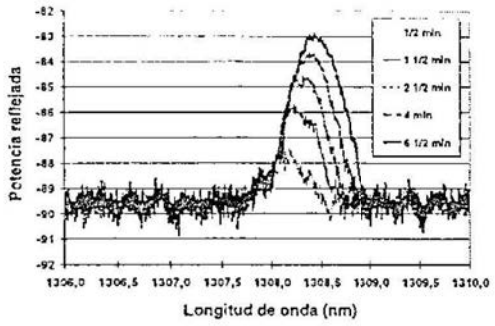

Figura 4: Evolución de la reflecitvidad de una red de difracción en fibra durante su grabado.

3.b.-Transductores de fibra óptica basados en modulación del índice de refracción

Muchos fenómenos pueden ser detectados a través de un cambio en el índice de refracción de un material, y de ahí su interés para el sensado. Con esta idea, se han desarrollado transductores de fibra óptica, basados en curvaturas, que permiten la medida de un parámetro a través de la modificación del índice del medio externo [29]. Por ejemplo, empleando un gel de silicona, se han simulado y demostrado experimentalmente transductores de temperatura.

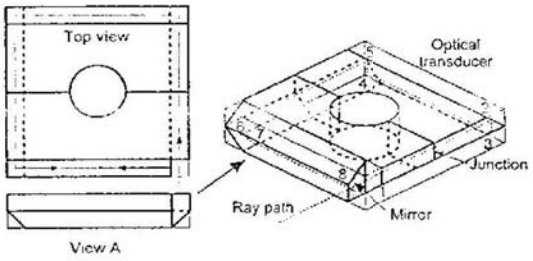

Figura 5: Transductor magneto-óptico con espejo interno.

3.c.-Transductores de fibra óptica para medidas eléctricas

Entre otros, se ha demostrado la viabilidad de un transductor magneto-óptico para la medida de corrientes eléctricas basado en un cristal BSO con espejo interno [30], que permite una mejora en la sensibilidad a la vez que minimiza el efecto de la birrefringencia lineal y la actividad óptica (véase la figura 5).

Igualmente, se ha demostrado un medidor de campo magnético basado en el efecto Faraday sobre redes de difracción en fibra (FBG), habiéndose considerado fibras sílice estándar [31] como fibras especiales de otros materiales [32].

3.d.-Transductores ópticos para el sensado de gases

En colaboración con el grupo del Prof. Culshaw de la Universidad de Strathclyde, se han desarrollados celdas sensoras, que empleando un nuevo diseño con óptica de bajo coste, permiten reducir sustancialmente el ruido interferométrico característico de las mismas.

4.- Instrumentación optoelectrónica

Es bien conocido en la actualidad que la fotónica y la electrónica son dos campos complementarios del conocimiento y de la técnica, siendo además imprescindible disponer de la instrumentación para reproducir en el dominio eléctrico la información proporcionada por los transductores ópticos.

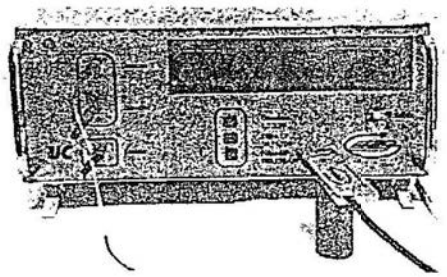

Figura 6: Unidad optoelectrónica basada en DSP.

En este sentido, y en el campo de la medida de vibraciones, se han desarrollado diversas unidades optoelectrónicas basadas tanto en técnicas analógicas como digitales. Un ejemplo de estas últimas se muestra en la figura 6 [34].

Por otro lado, se ha desarrollado un iluminador bio-fotónico de pequeña área, basado en diodo láser y fibra óptica monomodo, que permite iluminar células vivas individuales con la intención de analizar su respuesta antes los estímulos luminosos, y que se muestra en la figura 7.

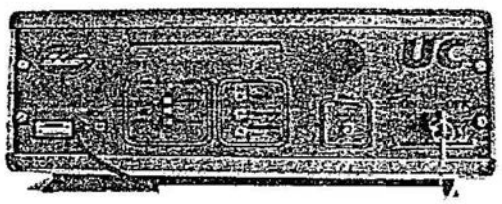

Figura 7: Iluminador bio-fotónico.

5.- Sistemas sensores y estructuras inteligentes

En el marco de diversos proyectos financiados, se han desarrollado sistemas sensores completos que se comentan en las próximas líneas.

Por ejemplo, se ha construido y caracterizado un sistema sensor multipunto para la medida en tiempo real de vibraciones en los ejes y los bobinados de grandes turbo-hidro-generadores [22], [23], [35], [36]. Este sistema ha sido integrado en una gran estructura cuasi-inteligente de monitorizado de vibraciones, en el marco de un proyecto BRITE/EURAM financiado por la Unión Europea [37], [38], [39], [40], y que ha sido exhaustivamente probada durante dos años en una central hidroeléctrica en Salamanca.

6.- Conclusiones

En este artículo, se han presentado brevemente los resultados de investigación y desarrollo más relevantes obtenidos durante los dos últimos años. Junto con los estudios para el análisis de dispositivos y circuitos fotónicos, se han presentado las contribuciones en nuevos efectos para la medida de magnitudes mecánicas, eléctricas y medio-ambientales, y que se han traducido en el diseño, construcción y caracterización de novedosos transductores para diversas magnitudes. Finalmente, se han descrito las contribuciones realizadas en diversa instrumentación optoelectrónica, sistemas sensores completos, así como estructuras inteligentes.

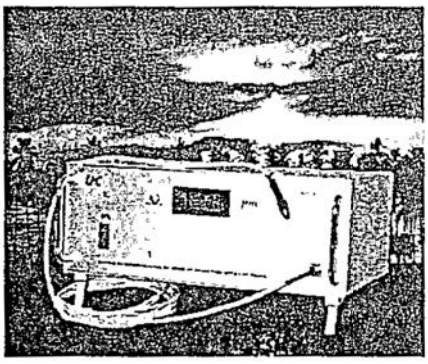

Figura 8: Unidad de interrogación.

7.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea, la C.I.C.Y.T. del Gobierno Español, el Consejo de Investigación en Ingeniería y Ciencias Físicas del Reino Unido, así como por empresas españolas como Iberdrola, Caja Cantabria y Alcatel Cable Ibérica. Así mismo, los autores muestran su agradecimiento a todos los colaboradores que han participado en las tareas de investigación.

8.- Bibliografía

[1] J.M. López-Higuera, Ed., of the book: "Optical Sensors", Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1998.

[2] M.A. Morante, A. Cobo, J.M. López-Higuera, and M. López-Amo, Optical Engineering, Vol. 35, No. 6, pp.1700-1706, 1996.

[3] M. A. Morante Rábago, PhD. Thesis, Universidad de Cantabria, 1998.

[4] A. Cobo, M. A. Morante, J.L. Arce, F.J. Madruga, C. Jaúregui, J. M. López-Higuera, Proceedings of the ODIMAP-II Conference, Pavia, Italy, 1999.

[5] A. Cobo García, PhD. Thesis, Universidad de Cantabria, 1999.

[6] G. He, F. W. Cuomo, Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, No. 4, April, 1991.

[7] A. Cobo, M. A. Morante, J.L. Arce, C. Jaúregui, J. M. López-Higuera, to be published at the Optical Fiber Sensors Conference (OFS) Proceedings, 1999.

[8] A. Cobo, M. A. Morante, J.L. Arce, C. Jaúregui, D. Pereda, M.A. Quintela, J. M. López-Higuera, Proceedings of the ODIMAP-II Conference, Pavia, Italy, 1999.

[9] J.L. Arce Diego, Pdh Thesis, Universidad Politecnica de Madrid, July, 1997.

[10] J.L. Arce Diego, Aranzazu Sanz, David Pereda, J.M. Lopez Higuera, IEEE-LEOS, WFOPC'98, Pavia, Italia, Septiembre,1998.

[11] Arce Diego, J.L., Morante, M. A., Madruga, F.J., López Higuera, J.M., ICO-EOS, Prague, June 1999.

[12] Arce, J.L., Muriel, M.A., Cobo, A., Morante, M.A. and López-Higuera, J.M., LEOS Conference Proceedings, Vol.II. IEEE Catalog Number:96CH35895, ISBN 0-7803-3160-5, Boston, November, 1996.

[13] J.L. Arce-Diego, M.A. Muriel, R. López-Ruisánchez and J.M. López-Higuera, Optical Fiber Technology, Octuber, 1997.

[14] Arce Diego, J.L., Echevarria Cuenca, J., Cobo, A., López Higuera, J.M., CLEO 98, Glasgow, Septiembre 1998.

[15] J.L. Arce-Diego , R. Montalbán-Carrasco, A. Cobo, J.M. López-Higuera, IEEE-LEOS, WFOPC'98, Pavia, Italia, Septiembre,1998.

[16] Arce Diego, Cobo, A., Pereda D., López Higuera, J.M., Photonics-99,ICO-EOS, Prague, June 1999.

[17] Arce Diego, Cobo, A., Jauregui C., López Higuera, J.M., Photonics-99, ICO-EOS, Prague, June 1999.

[18] M.A. Morante, G. Stewart, B. Culshaw, and J.M. López-Higuera in OSA Conference on

Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis, Orlando, USA, Paper LMC17, Technical Digest, pp. 81-83 (1998).

[19] Madruga Fco Javier, López Roberto, Cobo Adolfo, Echevarria Juan, López Higuera J. Miguel. XII Symposium URSI Bilbao 1997, V 2, pp 291-295

[20] Seeds, A. Salles, A.A.A. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol 38, No 5, 577-585, May 1990.

[21] M.Lomer, C. Navarro, F. J. Ruiz, A. Mediavilla, J.M. López-Higuera, URSI'97, Vol. I, pp 37-39, Bilbao, Septiembre 1997.

[22] J.M. López-Higuera, M.A. Morante, A. Cobo, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 7, pp.1120-1130, 1997.

[23] J.M. López-Higuera, P. Mottier, A. Cobo, E. Ollier, M.A. Morante, C. Chabrol, F.J. Madruga, P. Philippe, European Workshop on Optical Fibre Sensors, SPIE Vol. 3483, pp. 223-227, Peebles (U.K.), July, 1998.

[24] M.A. Morante, A. Cobo, and J.M. López-Higuera, IEEE Lasers and Electro-Optics Society 9th Annual Meeting (LEOS'96), Boston, MA, USA, Paper TuM4, Conference Proceedings Vol.1 pp. 240-241, 1996.

[25] M.A. Morante, A. Cobo, J.L. Arce-Diego, J.M. López-Higuera, European Workshop on Optical Fibre Sensors, SPIE Vol. 3483, pp. 35-39, Peebles (U.K.), July, 1998.

[26] M.A. Morante, A. Cobo, J.M. López-Higuera, Proceedings of the ODIMAP-II Conference, Pavia, Italy, 1999.

[27] A. Cobo, M.A. Morante, J.L. Arce, J.M. López-Higuera, Proc. CLEO/EUROPE-EQEC'98, p 197, Glasgow, (U.K.), 13-18 September, 1998.

[28] A. Cobo, J. Echevarría, F.J. Madruga, C. Jaúregui, M. A. Quintela, J. M. López-Higuera, Proceedings of the ODIMAP-II Conference, Pavia, Italy, 1999.

[29] Arce Diego J.L. ,Echevarria Cuenca, J., Morante, M.A., Cobo, A., Madruga Saavedra, F.,Lomer, M., López Higuera, J.M., OFS Europe, Peebles (Scotland),Julio 1998.

[30] Arce-Diego, J.L., López-Ruisánchez, R., López-Higuera, J.M. and Muriel, M.A., Applied Optics, Vol. 36, N° 25, pp. 6242-6245, Septiembre 1997.

[31] Arce, J.L., López-Higuera, J.M. and Muriel, M.A., LEOS Conference Proceedings, Vol.II. IEEECatalog Number:96CH35895, ISBN 0-7803-3160-5, Boston, November, 1996.

[32] Arce-Diego, J.L., López-Ruisánchez, R., López-Higuera, J.M. and Muriel, M.A., Optics Letters, pp.603-605, Mayo, 1997.

[33] M.A. Morante, G. Stewart, B. Culshaw, and J.M. López-Higuera, Electronics Letters, Vol. 33, No. 16, pp.1407-1409 (1997).

[34] D. Luengo, C. Pantaleón. I. Santamaría, J. Ibañez, C. López, F. J. Madruga, A. Cobo, J. M. López-Higuera, Proc. 9th International Conference on Signal Processing Applications & Technology, ICSPAT'98, September, 1998.

[35] J.M. López-Higuera, A. Cobo, M.A. Morante, J. Echevarría, J.L. Arce, M. Lomer, and R. López, Second International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, Enrico P. Tomasini, Editor, Proc. SPIE 2868, pp. 510-515, 1996.

[36] J.M. López-Higuera, A. Cobo, M.A. Morante, F.J. Madruga, 12th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, Paper OFA4, Conference Proceedings, pp. 608-611, 1997.

[37] J.M. López-Higuera, M.A. Morante, A. Cobo, J. Echevarría, F.J. Madruga, Chapter 7 of "Optical Sensors", J. M. López-Higuera, Ed., S. de P. de la Universidad de Cantabria, 1998.

[38] J.M. López-Higuera, I. Santamaría, A. Cobo, C. Pantaleón, M.A. Morante, J. Ibáñez, J. Echevarría, Proc. CLEO/ EUROPE-EQEC'98, p 196, Glasgow, (U.K.), 13-18 September, 1998.

[39] F. Arregui, C. Mazzieri, C. Pantalcón, E. Gómez, P. Mottier, J. Marcou, J.L. García, I. Santamaría, J.M. López Higuera, F. Viadero, EURO-MAINTENANCE'96, Copenhagen (Denmark), May 1996.

[40] J. M. López-Higuera, I. Santamaría, P. Mottier, A Cobo, C.Pantaleón, E. Ollier, M. A. Morante, J. Ibáñez, Cl. Chabrol, F. J. Madruga. To be published.