



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ Número de publicación: **2 332 340**

⑫ Número de solicitud: 200700008

⑬ Int. Cl.:

G01B 9/02 (2006.01)

G02B 6/28 (2006.01)

G02B 6/255 (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

⑫ Fecha de presentación: **26.12.2006**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **02.02.2010**

⑬ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
02.02.2010

⑰ Solicitante/s: **INSTITUT DE CIENCIES
FOTONQUES, FUNDACIO PRIVADA**
Parque Mediterráneo de la Tecnología
Avda. del Canal Olímpico, s/n
08860 Castelldefels, Barcelona, ES

⑱ Inventor/es: **Joel Villatoro, Agustín;
Pruneri, Valerio y
Badenes, Goncal**

⑲ Agente: **Carpintero López, Francisco**

⑳ Título: **Interferómetro de fibra óptica.**

㉑ Resumen:

Interferómetro de fibra óptica.

Un interferómetro compacto y estable que se construye fácilmente sólo con empalmes por fusión. El espectro de transmisión es sinusoidal y de una sola frecuencia, lo cual indica interferencia predominante entre el modo fundamental del núcleo (7) y un modo de revestimiento (6). Se puede observar un espectro de interferencia regular desde 650 nm hasta 1600 nm con visibilidad de franjas que alcanza el 80%. La separación entre las franjas es inversamente proporcional a la distancia entre los empalmes. Este comportamiento tiene un impacto significativo en dispositivos sensores ópticos y en las comunicaciones y por lo tanto el interferómetro se puede aplicar como sensor de tensión. El dispositivo comprende dos empalmes (5) en una fibra óptica micro-estructurada (1), separadas una longitud (L) a lo largo de la cual se excitan los dos modos referidos, los empalmes (5) determinan dos regiones en las cuales los agujeros de aire (4) se colapsan.

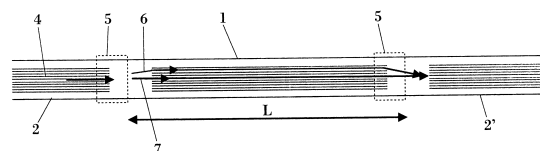


FIG. 3

ES 2 332 340 A1

DESCRIPCIÓN

Interferómetro de fibra óptica.

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere en general a la fabricación de dispositivos basados en fibra óptica y, más particularmente, a un interferómetro basado en fibras ópticas micro-estructuradas que se puede usar en un elemento sensor aplicable para medir diversos parámetros físicos que se convierten en cambios en la interferencia de salida.

10 **Estado de la técnica**

En óptica, los interferómetros fabricados totalmente con fibra óptica son dispositivos importantes puesto que son útiles en diversas aplicaciones; metrología de ultra alta resolución y modulación de la luz son sólo dos ejemplos. Los 15 interferómetros de fibra óptica también pueden ser dispositivos clave en instrumentos modernos tales como giróscopos.

Un número diverso de enfoques se han propuesto para construir interferómetros con fibras ópticas convencionales.

Con la llegada de las denominadas fibras ópticas micro-estructuradas (MOF, del inglés *microstructured optical fibers*) se abren muchas otras alternativas para la construcción de interferómetros que pueden ser útiles en amplias áreas de aplicación.

Una fibra óptica microestructurada (MOF), también conocida como fibra de cristal fotónico (PCF, del inglés *photonic crystal fiber*), es una nueva clase de fibra óptica que tiene una sección transversal microestructurada (normalmente uniforme a lo largo de la longitud de la fibra) a partir de dos o más materiales, más comúnmente con una disposición periódica sobre gran parte de la sección transversal, normalmente como un revestimiento que envuelve un núcleo (o 25 diversos núcleos) donde se confina la luz. De hecho, en la bibliografía se conocen dos tipos de MOF, dependiendo del mecanismo físico responsable del confinamiento y del guiado de la luz óptica. Uno de estos tipos de MOF se caracteriza porque la luz se guía por reflexión total interna (TIR, del inglés *total internal reflection*). En el caso TIR, el 30 núcleo está hecho de un material de índice de refracción alto rodeado por un revestimiento hecho de una disposición adecuada de regiones de índice de refracción alto y bajo, típicamente un patrón de agujeros microscópicos de aire en el plano transversal a lo largo de toda la longitud de la fibra. Por este motivo, este tipo de MOF se denomina también “fibra agujerada”.

A diferencia de las fibras ópticas convencionales, las MOF pueden ser monomodo desde el visible hasta el infrarrojo cercano. Además, se pueden diseñar MOFs con múltiples núcleos o con agujeros de aire de diferentes formas (véase “Photonic Crystal Fibers” de *Philip Russell*, SCIENCE, vol. 299, pp. 358-362, 17 enero de 2003).

Se han construido nuevos interferómetros modales poniendo en cascada dos rejillas de periodo largo idénticas 40 (véase “Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period gratings” de *Jong H. Lim et al.*, OPTICS LETTERS, vol. 29, No. 4, pp. 346-348, 15 Febrero de 2004) o usando una MOF con agujeros de aire de diferentes diámetros (véase “Two-mode photonic crystal fibers” de *J. Ju et al.*, OPTICS EXPRESS, vol. 13, No. 6, pp. 2082-2088, 21 de marzo de 2005). Sin embargo, estos enfoques padecen diversas limitaciones de construcción.

En resumen, los interferómetros Mach-Zehnder basados en un par de rejillas de periodo largo formadas en fibras monomodo convencionales han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, a diferencia de las fibras monomodo convencionales, es bastante difícil formar un par de rejillas de periodo largo 3-dB idénticas en una PCF. Mientras que el modo de revestimiento correspondiente a una fibra monomodo está completamente estudiado y comprendido, en 50 una PCF el modo de revestimiento no está bien definido. Aunque la inducción mecánica de dos rejillas de periodo largo idénticas en una PCF con el fin de realizar un interferómetro Mach-Zehnder totalmente de fibra óptica, como proponen *Jong H. Lim et al.*, ayuda a estudiar las propiedades de los modos del revestimiento guiados a lo largo de la PCF, no se consigue tenerlas controladas y hace el comportamiento de guiado modal dependiente restrictivamente de los severos requisitos de construcción del par de rejillas de periodo largo en la PCF.

Respecto de las PCF de dos modos descritas por *J. Ju et al.*, estas fibras se caracterizan por: requerir condiciones críticas de inyección y polarización de la fuente de luz a la fibra, inestabilidad y fuerte dependencia de la temperatura (como se demuestra en “Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor”, *J. Jian et al.*, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 18, No. 20, pp. 2168-2170, 15 de octubre de 2006). Además 60 de estas restricciones, la excitación de los dos modos es posible exclusivamente una PCF construida bajo parámetros muy específicos: dimensión de agujeros de aire y distancia de separación entre agujeros de aire determinados.

Otra manera de construcción de interferómetros compactos descrita recientemente consiste en combinar la MOF con tecnología de adelgazamiento (como en “Compact modal interferometer built with tapered micro-structured optical fiber” de *J. Villatoro et al.*, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 18, No. 11, pp. 305-307, 1 de 65 junio de 2006). La fibra se adelgaza al estirarla suavemente mientras una zona de longitud L se calienta con un soplete oscilante de alta temperatura. Con este procedimiento de adelgazamiento “lento y caliente”, se logra una cintura uniforme de ancho ρ_0 en la MOF adelgazada en la cual los agujeros de aire se colapsan y se transforma así en una región

sólida multimodal sin revestimiento. El modo fundamental HE_{11} de la fibra agujerada se acopla a los modos HE_{1m} de la fibra sólida. Las zonas de contracción y expansión son equivalentes a los acopladores en un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica, mientras que los modos de la sección sólida son equivalentes a los brazos. La mejora introducida por esta solución es la posibilidad de ajustar los parámetros geométricos durante la fabricación del dispositivo interferométrico. Sin embargo, la desventaja de este interferómetro es un patrón oscilatorio irregular e impredecible.

Todas estas técnicas y otras más descritas hasta ahora para la fabricación de interferómetros basados en MOF presentan severos retos en términos de complejidad y/o fabricación.

Sumario de la invención

Con la presente invención se pretenden resolver los problemas señalados anteriormente dada la necesidad actual de simplificar la fabricación de dispositivos sensores e interferométricos integrados de fibra usando fibras de cristal fotónico o fibras ópticas micro-estructuradas (MOF).

Un objetivo de la presente invención es conseguir un interferómetro estable mediante empalme por fusión de una fibra óptica micro-estructurada.

De este modo, un aspecto de la presente invención se refiere a un interferómetro de fibra óptica, como se define en la reivindicación 1, que comprende una fibra óptica micro-estructurada monomodo de guiado de índice que tiene sus agujeros de aire colapsados en dos regiones separadas por un fragmento de dicha fibra óptica micro-estructurada a lo largo de la cual se excitan dos modos. Para obtener estas dos regiones, tal fragmento o longitud de la fibra óptica micro-estructurada (MOF) se empalma, con una empalmadora de fusión estándar, con dos fibras ópticas respectivas, que también pueden ser MOF o fibras ópticas convencionales.

Cuando se empalman dos MOF, o una MOF y una fibra óptica convencional, los agujeros de aire del fragmento de MOF se colapsan completamente en las inmediaciones del empalme. El colapso de los agujeros en una región pequeña de la MOF no es un inconveniente serio de los empalmes por fusión, ya que puede introducir mínimas pérdidas cuando se reducen convenientemente (aproximadamente un 50%) el tiempo de calentamiento y la corriente eléctrica del procedimiento convencional de empalme por fusión por descarga eléctrica. El colapso de los agujeros de aire transforma una zona de la MOF en una fibra óptica multimodo sólida. Además, el colapso de los agujeros microscópicos de aire se explota para sellar herméticamente el extremo de las MOF lo cual simplifica su conectorización e incrementa su eficiencia de acoplamiento. Los procedimientos de corte y empalme duran sólo unos pocos minutos y se pueden llevar a cabo con equipos estándar de manipulación de fibras ópticas.

Mientras que en la mayoría de los trabajos con MOFs que se han realizado en el estado de la técnica, se intenta evitar el colapso de los agujeros de aire a toda costa, aquí precisamente es el colapso de dichos agujeros lo que de manera “inesperada” permite la creación de este nuevo dispositivo interferométrico construido totalmente de fibra óptica.

El colapso de los agujeros de aire, canales de aire o huecos de la MOF en una región pequeña hace que el modo fundamental de la MOF se ensanche cuando éste alcanza el primer empalme. Gracias a este fenómeno, es posible excitar el modo fundamental y modos de orden superior de la MOF (aquí se hace referencia a los modos del núcleo y los modos del revestimiento, respectivamente, por similitud con las fibras convencionales) en el fragmento de MOF entre los empalmes por fusión. De hecho, para ser más precisos, los modos de orden superior en las MOF (denominados modos del revestimiento) están bien confinados dentro del límite entre la estructura y el aire, mientras que en las fibras convencionales, los modos de revestimiento alcanzan el límite exterior con el aire. De todas formas cabe mencionar que los modos de orden superior en las MOF se convierten en modos de revestimiento “verdaderos” cuando la sección transversal de la fibra se reduce (como en “Compact modal interferometer built with tapered micro-structured optical fiber” de *J. Villatoro et al.*, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 18, No. 11, pp. 305-307, 1 de junio de 2006), haciendo así la estructura e interferómetros relacionados más sensibles a cualquier cambio de índice de refracción del medio que la rodea (por ejemplo, gas, líquido, etc...).

Los modos excitados se recombinan en el segundo empalme. En este interferómetro, los dos modos desempeñan el papel de brazos y las regiones colapsadas (empalmes) desempeñan la función de acopladores o divisores, siendo una realización preferida de la invención un interferómetro Mach-Zehnder totalmente de MOF. Los modos de núcleo y revestimiento tienen constantes de propagación diferentes y acumulan una diferencia de fase al propagarse sobre la longitud de la MOF entre los empalmes. Las constantes de propagación y la diferencia de fase acumulada dependen de la longitud de onda. Por lo tanto, si uno lanza luz al interferómetro de una fuente de luz de espectro amplio y la luz de salida se envía a un analizador de espectros ópticos, el espectro resultante puede ser modulado por la diferencia de fase de los modos.

De esta manera, en el interferómetro (totalmente) de fibra óptica construido con estos dos empalmes por fusión, la potencia óptica transmitida presenta máximos en ciertas longitudes de onda y mínimos en otras. El periodo del patrón de intensidad es inversamente proporcional a la longitud de MOF entre los dos empalmes. Este interferómetro exhibe espectros de interferencia verdaderamente sinusoidales y estables que se observan en un intervalo ancho de longitudes de onda (con ancho de banda de aproximadamente 800 nanómetros). Dada la naturaleza de una sola frecuencia del patrón, solamente se excitan dos modos (el modo fundamental y un modo de orden superior) en un intervalo de

longitud de onda desde 650 hasta 1600 nanómetros aproximadamente. Además, la visibilidad del patrón de intensidad que se puede conseguir (superior al 80%) indica una interferencia casi perfecta entre los dos modos.

El interferómetro de dos modos descrito en la presente memoria descriptiva es más sencillo que los descritos en las técnicas anteriores, los basados en rejillas de periodo largo idénticas o en MOF de dos modos, incluso teniendo en común que los brazos de los interferómetros son típicamente dos modos, porque en la presente invención hay la posibilidad de controlar su construcción ajustando sólo un parámetro geométrico del fragmento de MOF (su longitud) y no hay dependencias de temperatura, lanzamiento de luz y polarización que requieran un control exterior de la luz por medios ópticos o mecánicos.

Cualquier pequeña variación en la longitud de camino óptico experimentada por los dos modos que se propagan en la parte central del dispositivo, que podría ser por ejemplo debida a la modificación de la longitud física L o a cambios en el índice de refracción, modifica la diferencia de fase entre los modos que interfieren y hace que el espectro de interferencias se desplace. Si, por ejemplo, el interferómetro se somete a una tensión longitudinal, el patrón de interferencia se desplaza a longitudes de onda más cortas. En consecuencia, el dispositivo se puede utilizar como sensor de esfuerzos.

Obsérvese que una tensión longitudinal aplicada al interferómetro totalmente de fibra óptica se considera uno de los posibles parámetros para establecer un ejemplo de aplicación de la invención en el campo de sensores, pero hay otros parámetros que pueden afectar la diferencia de índice de refracción en el interferómetro totalmente de fibra óptica, no solo la longitud física, y aún traducirse en movimiento del patrón de franjas. La clave para sensar con este interferómetro totalmente de fibra óptica es cambiar la diferencia de camino óptico entre los dos modos excitados en la longitud de MOF, donde camino óptico significa el producto de la longitud física y el índice de refracción efectivo experimentado por cada modo. Debido al hecho de que el modo de orden superior está más extendido espacialmente que el modo fundamental, cualquier líquido sobre la fibra, por ejemplo, podría afectar su índice de refracción más que el del fundamental, a causa de la mayor cercanía del líquido a intensidad guiada. Comúnmente, si los dos índices de refracción varían de una manera diferente como consecuencia de cualquier parámetro a sensar entonces la interferencia se moverá y se producirá la detección.

Por lo tanto, se puede prever la detección de otros parámetros, puesto que cualquier parámetro físico tal como sonido, vibración, temperatura, presión, etc. se pueden trasladar a cambios en la diferencia de camino óptico entre los dos modos excitados y, en particular, a cambios de tensión. Las modificaciones en el medio circundante de la fibra óptica como la presencia de líquidos, gases, inmunorreacciones, etc., también pueden dar como resultado cambios en esta longitud óptica, que a su vez crean cambios en la señal de interferencia de salida. Los interferómetros contruidos con fibras micro-estructuradas son muy atractivos puesto que pueden tener un impacto significativo en sensores ópticos y en comunicaciones ópticas. Las aplicaciones potenciales del interferómetro totalmente de MOF presentados en la presente memoria son sólo algunos ejemplos e incluyen también la posibilidad del filtraje modal o de longitud de onda, o la fabricación de atenuadores.

Según otro aspecto de la invención, se proporciona un dispositivo interferométrico para el sensado de tensión que comprende el interferómetro totalmente de fibra óptica descrito previamente y al menos un elemento de movimiento lineal fijado a al menos un punto de dicho interferómetro totalmente de fibra óptica para enderezar al menos el fragmento de MOF y para introducir micro alargamientos en la longitud de dicha MOF.

La construcción de dichos dispositivos definidos en la presente memoria, que comprenden solamente dos empalmes en una MOF separados por unas pocas decenas de milímetros (la longitud de MOF en la cual están acoplados los modos de núcleo y del revestimiento puede alcanzar 10 centímetros), es simple y rápida puesto que solamente se requiere cortar la fibra y empalmarla por fusión. Otro aspecto de la presente invención se refiere a un procedimiento para la construcción de un interferómetro totalmente de fibra óptica, que comprende los siguientes pasos:

- cortar una fibra micro-estructurada de guiado de índice que comprende al menos cuatro anillos de agujeros de aire y dos fibras ópticas monomodo, que pueden ser fibras ópticas convencionales o micro-estructuradas;

- empalmar por fusión la fibra óptica micro-estructura de guiado de índice con las dos fibras ópticas monomodo con una separación centro a centro entre los dos empalmes de una longitud no superior a 10 centímetros;

- aplicar un tiempo de calentamiento y una corriente eléctrica para cada uno de los dos empalmes por fusión de manera que se permita el estrechamiento de los agujeros de aire de la longitud de MOF hasta un colapso total.

En este documento, el término “comprende” y sus derivaciones (tal como “comprender”, etc.) no deberán ser entendidas en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deberán ser interpretados como excluyentes de la posibilidad de que lo descrito y definido pueda incluir otros elementos, otros pasos, etc.

En el contexto de la presente invención, el término “aproximadamente” y los términos de su familia (tales como “aproximado”, etc.) deberán entenderse como valores indicativos muy cercanos a los que acompañan el término anteriormente mencionado. Es decir, una desviación dentro de límites razonables de un valor exacto deberá ser aceptada, porque un experto en la técnica entenderá que tal desviación de los valores indicados es inevitable debido a imprecisiones de medición, etc. Lo mismo se aplica al término “alrededor de”.

Las ventajas y características adicionales de la invención se harán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada.

Breve descripción de los dibujos

Con el fin de proporcionar una mejor comprensión de la invención, se proporciona un conjunto de dibujos, que no deberán ser interpretados como limitativos del alcance de la invención, sino solamente como un ejemplo de cómo la invención puede ser realizada. Los dibujos comprenden las siguientes figuras:

En la figura 1 se muestra una sección transversal de una fibra óptica micro estructurada empleada para construir el diseño preferido de la presente invención.

En la figura 2 se muestra una microfotografía de uno de los dos empalmes formados en la fibra óptica micro-estructurada previamente descrita, según el objeto de la invención.

En la figura 3 se muestra una representación esquemática del interferómetro totalmente de fibra óptica micro-estructurada, los empalmes se ilustran como áreas blancas y las líneas horizontales corresponden a la región agujerada de las fibras ópticas micro-estructuradas.

En la figura 4 se muestra un espectro de transmisión normalizado del interferómetro totalmente de fibra óptica micro-estructurada con una longitud de onda central alrededor de 850 nm, según una posible realización de esta invención con una longitud de fibra óptica micro-estructurada $L = 6.35$ cm.

En la figura 5 se muestra una representación gráfica del periodo promedio del interferómetro totalmente de fibra óptica micro-estructurada en función de la longitud L , medida en centímetros, de la fibra óptica micro-estructurada entre los empalmes, siendo los puntos valores experimentales y la línea continua un ajuste exponencial de dichos valores.

En la figura 6 se muestra la representación gráfica de la potencia transmitida normalizada del interferómetro totalmente fibra óptica micro-estructurada con una longitud $L = 7.5$ cm, según otra posible realización de esta invención, en función de la longitud de onda expresada en nanómetros.

En la figura 7 se muestran los espectros de interferencias normalizados de un sensor interferométrico de tensión basado en el interferómetro totalmente de fibra óptica micro-estructurada con una longitud $L = 8.6$ cm, según otro ejemplo de realización de la invención, sometido a micro-alargamiento de 0 (línea sólida) y a $750 \mu\epsilon$ (línea punteada), refiriéndose la unidad $\mu\epsilon$ a microesfuerzo definida como 10^{-6} veces el cambio de longitud por unidad de longitud, es decir, $1 \mu\epsilon = 10^{-6} \delta L/L$.

En la figura 8 se muestra una representación gráfica del desplazamiento que experimenta el espectro de interferencias del sensor interferométrico de tensión cuando se aplica un micro-alargamiento de $750 \mu\epsilon$, mostrado en la figura anterior, en función de la tensión aplicada (cuadrados) o eliminada (cruces), siendo la línea continua un ajuste lineal de los datos experimentales.

Descripción de realizaciones preferidas de la invención

Para la construcción de un interferómetro Mach-Zehnder se usa una fibra óptica micro-estructurada de guiado de índice (1) que consiste en un núcleo sólido (3) rodeado por anillos de agujeros de aire (4), los cuales pueden estar dispuestos en un patrón hexagonal, como se muestra en la figura 1. Por ejemplo, es posible usar MOF disponible comercialmente con un núcleo de $11 \mu\text{m}$ de diámetro, agujeros con un diámetro medio de $2.7 \mu\text{m}$, y una separación media entre los agujeros de $5.45 \mu\text{m}$. La fibra tiene un diámetro exterior de $125 \mu\text{m}$. Este tipo de MOF guía la luz por el principio de reflexión interna total modificada. Esta fibra de guiado de índice es monomodo desde 620 nm hasta 1600 nm.

Este interferómetro totalmente de MOF comprende dos empalmes (5) en los cuales los agujeros de aire (4) que determinan la región agujerada (8) de la MOF están totalmente colapsados, como se muestra en la figura 2. La longitud de la región colapsada (9) en cada empalme (5) es de aproximadamente 300 micrómetros. El colapso de los agujeros de aire (4) hace que el haz de luz que se propaga se ensanche, permitiendo el acoplamiento de dos modos electromagnéticos: el modo del núcleo (7) y el modo del revestimiento (6), en una longitud (L) de fibra óptica micro-estructurada (1) entre los empalmes, descritos en la figura 3 y determinados por la separación centro a centro entre sus dos regiones colapsadas (9).

Ambos empalmes se llevan a cabo con una empalmadora por fusión convencional, como por ejemplo una Fitel S122A o una máquina empalmadora Ericsson. Antes del empalme las fibras se cortan con un cortador de alta precisión, por ejemplo, Fitel modelo S325. Para minimizar las pérdidas y obtener empalmes robustos, el tiempo de calentamiento y la corriente de los electrodos de la empalmadora se reducen en aproximadamente el 50% con respecto a los valores usados habitualmente para empalmar fibra monomodo convencional. Obsérvese en la imagen de la figura 2 que los agujeros o canales de aire de la MOF -las líneas horizontales de la micrografía- se estrechan antes de colapsarse completamente. Obsérvese también que el diámetro exterior de la MOF es esencialmente uniforme incluso en la región con canales de aire colapsados.

La fabricación del interferómetro se puede monitorizar *in situ* y en tiempo real. Para ello se puede usar una fuente de luz de baja potencia, tal como un diodo emisor de luz (LED) con pico de emisión a 850 nm y 50 nm de ancho espectral, y un espectrómetro óptico de bajo coste para monitorizar el espectro de interferencias. Se debe señalar que las pérdidas de cada empalme, a 850 nm son inferiores a 2 dB, y que tales pérdidas probablemente puedan reducirse aún más con una optimización del proceso de empalmado.

En la Figura 3 se ilustra el ensanchamiento del modo fundamental de la MOF, o modo del núcleo (7), en la zona en la cual los agujeros de aire se colapsan gradualmente, lo que permite la excitación de los modos de núcleo (7) y del revestimiento (6) en la longitud (L) de MOF entre los empalmes. Los modos se recombinan luego en el segundo empalme. Los dos modos excitados en la fibra entre los empalmes desempeñan la función de los brazos del interferómetro y las regiones colapsadas (9) desempeñan la función de acopladores o divisores en el interferómetro Mach-Zehnder. Los modos del núcleo (7) y del revestimiento (6) tienen constantes de propagación diferentes y acumulan una diferencia de fase a medida que se propagan sobre la longitud (L) de la MOF. Es importante colapsar los agujeros de aire (4) en una región corta, de 300 micrómetros o menos, puesto que el colapso de estos permite el acoplamiento del modo fundamental (6) a un modo de revestimiento (7). Es fundamental tener fibra óptica micro-estructurada de guiado de índice, ya que el ensanchamiento no se produce con una fibra óptica convencional.

El espectro de interferencias de la figura 4 tiene una envolvente de tipo Gaussiano debido al espectro de salida del LED. Durante las mediciones, la longitud (L) de fibra entre los empalmes, se mantiene recta ya que el doblamiento afectada fuertemente al patrón de interferencia. En este aspecto, el interferómetro totalmente de MOF que se propone es similar a los construidos con MOF de dos núcleos. Las franjas de interferencia se acercan a medida que la longitud (L) se incrementa; esta propiedad se resume en la figura 5, en la que el periodo promedio (Δ) del interferómetro se reduce a medida que la longitud (L) se incrementa siguiendo la ley: $\Delta \cdot L = \text{constante}$.

El funcionamiento del interferómetro ha sido demostrado también en longitudes de onda más largas, en la región del infrarrojo cercano del espectro, hasta 1600 nm, gracias a que la mayoría de fibras MOF muestran un comportamiento monomodal en un intervalo muy amplio de longitudes de onda. Con este fin, se usa un láser sintonizable como fuente de luz y la potencia óptica de salida se mide con un fotodetector de InGaAs. En la figura 6, se observan una serie de máximos y mínimos en longitudes de ondas cercanas a 1510 nm. Este patrón de interferencia sinusoidal de una sola frecuencia indica que solamente dos modos interfieren, debido a que sus velocidades de fase y su diferencia de fase son dependientes de la longitud de onda. La visibilidad de las franjas se calcula en aproximadamente un 80%. La visibilidad es mejor que en los ejemplos mostrados más arriba debido a la alta coherencia del láser de 1500 nm. El periodo medio del espectro de interferencia que se muestra en la figura 6 es 3.1 nm. Obsérvese en la figura 4 que el periodo a 850 nm del dispositivo con $L = 7.5$ cm es 2.6 nm. Esto indica que el periodo de los interferómetros totalmente de MOF construidos con empalmes se incrementa con la longitud de onda.

Gracias al desplazamiento del patrón de interferencia cuando el interferómetro esta recto y sometido a tensión longitudinal, el dispositivo también se puede usar como un sensor de tensión modulado en intensidad, que es una alternativa al sensor de tensión codificado en longitud de onda. En la figura 7 se muestra tal desplazamiento del patrón de interferencia de un interferómetro totalmente de MOF con $L = 8.6$ cm. Para introducir microalargamientos al dispositivo, éste se asegura entre dos monturas mecánicas de desplazamiento separadas una distancia de 8 cm para garantizar que solamente la longitud (L) de MOF entre los empalmes es sometida a la tensión aplicada. El espectro de interferencia se desplaza cuando el dispositivo está bajo tensión, como se muestra en la figura 8. Nótese el comportamiento lineal del dispositivo así como su reversibilidad.

Para una longitud de onda central (λ) de la fuente de luz, medida en nanómetros, el espaciamiento entre las franjas del espectro de interferencia es comparable a los mejores interferómetros existentes, mostrando una separación entre franjas de aproximadamente $\lambda/300$. Se pueden detectar desplazamientos del espectro de interferencia de alrededor de $\lambda/4000$.

El interferómetro y los dispositivos sensores que esta invención propone pueden operar en un amplísimo intervalo de temperatura, desde -40°C hasta 1000°C, de manera que la presente invención es apropiada para entornos de trabajo hostiles. Obsérvese que las redes de Bragg en fibra óptica empiezan a degradarse cuando la temperatura ronda los 300°C. Otra propiedad de robustez de los dispositivos descritos en esta memoria es la independencia de la polarización de la luz, de modo que pueden funcionar con una fuente de luz remota que lance luz desde una gran distancia sin necesidad de usar fibras que mantienen la polarización, cuyo coste es elevado.

Obviamente la invención no se limita a las realizaciones específicas descritas en la presente memoria, sino que también comprende otras variaciones que puedan ser consideradas por cualquier experto en la técnica (por ejemplo, respecto de la elección de componentes, configuración, etc.), dentro del alcance general de la invención como se define en las reivindicaciones anexas.

REIVINDICACIONES

1. Interferómetro de fibra óptica que comprende al menos una fibra óptica micro-estructurada (1) de guiado de índice, que a su vez comprende un núcleo sólido (3) rodeado por un revestimiento con al menos cuatro anillos de agujeros de aire (4), que se **caracteriza** porque comprende dos empalmes (5) de dicha fibra óptica micro-estructurada (1) con respectivas fibras ópticas monomodo (2, 2') y dichos empalmes (5) determinan dos regiones en las cuales los agujeros de aire (4) de la fibra óptica micro-estructurada (1) se colapsan, siendo la separación de centro a centro entre dichas dos regiones una longitud (L) de la fibra óptica micro-estructurada (1) a lo largo de la cual se excitan dos modos electromagnéticos.

2. Interferómetro de fibra óptica según la reivindicación 1, en el cual al menos una de las fibras ópticas monomodo (2, 2') es una fibra óptica micro-estructurada.

3. interferómetro de fibra óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en el que al menos una de las fibras ópticas monomodo (2, 2') es una fibra óptica convencional.

4. Interferómetro de fibra óptica según cualquier reivindicación anterior, en el que los dos modos electromagnéticos excitados son el modo de revestimiento (6) y el modo de núcleo (7).

5. Interferómetro de fibra óptica según cualquier reivindicación anterior, en el que la longitud (L) de la fibra óptica micro-estructurada (1) a lo largo de la cual se excitan los dos modos electromagnéticos es de 10 centímetros o menos.

6. Interferómetro de fibra óptica según cualquier reivindicación anterior, en el que los dos empalmes (5) de la fibra óptica micro-estructurada (1) se realizan mediante una máquina empalmadora de fusión estándar.

7. Interferómetro de fibra óptica según cualquier reivindicación anterior, en el que dicho interferómetro es un interferómetro Mach-Zehnder.

8. Un dispositivo sensor de tensión interferométrico que comprende el interferómetro de fibra óptica definido según cualquier reivindicación anterior y al menos un elemento de movimiento lineal fijado a al menos un punto de dicho interferómetro de fibra óptica para enderezar la fibra óptica micro-estructurada (1) y para la introducción de micro-alargamientos a la longitud (L) de dicha fibra óptica micro-estructurada (1).

9. Procedimiento para la construcción de un interferómetro de fibra óptica, que se **caracteriza** porque comprende los siguientes pasos:

- cortar una fibra óptica micro-estructurada (1) de guiado de índice, que comprende al menos cuatro anillos de agujeros de aire (4), y dos fibras ópticas monomodo (2, 2')

- empalmar por fusión la fibra óptica micro-estructurada (1) con las dos fibras ópticas monomodo (2, 2'), siendo la separación de centro a centro entre los dos empalmes (5) de dicha fibra óptica micro-estructurada (1) una longitud (L) de 10 centímetros o menos;

- en cada uno de los dos empalmes (5), estrechar los agujeros de aire (4) de dicha fibra óptica micro-estructurada (1) hasta el colapso total de dichos agujeros de aire (4).

10. Procedimiento según la reivindicación 9, en donde se aplican un tiempo de calentamiento y una corriente eléctrica para el empalmado por fusión de la fibra óptica micro-estructurada (1) los cuales son aproximadamente el 50% del tiempo de calentamiento y de la corriente eléctrica usados convencionalmente para el empalme por fusión de fibras ópticas.

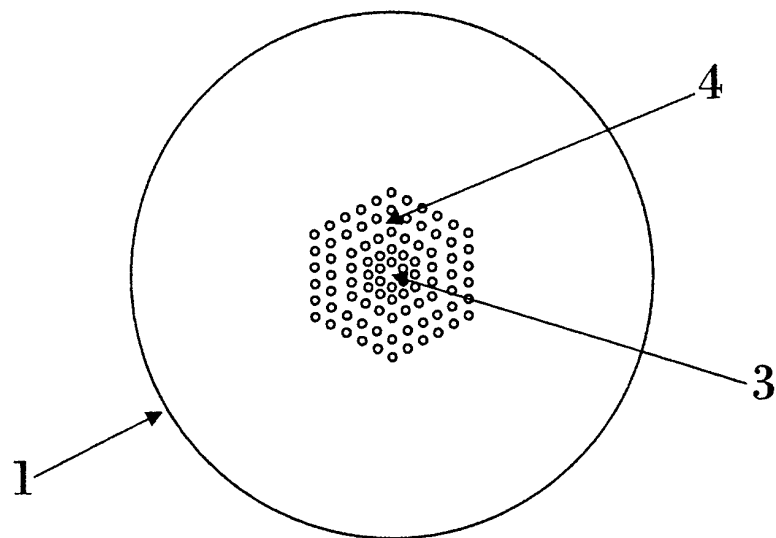


FIG. 1

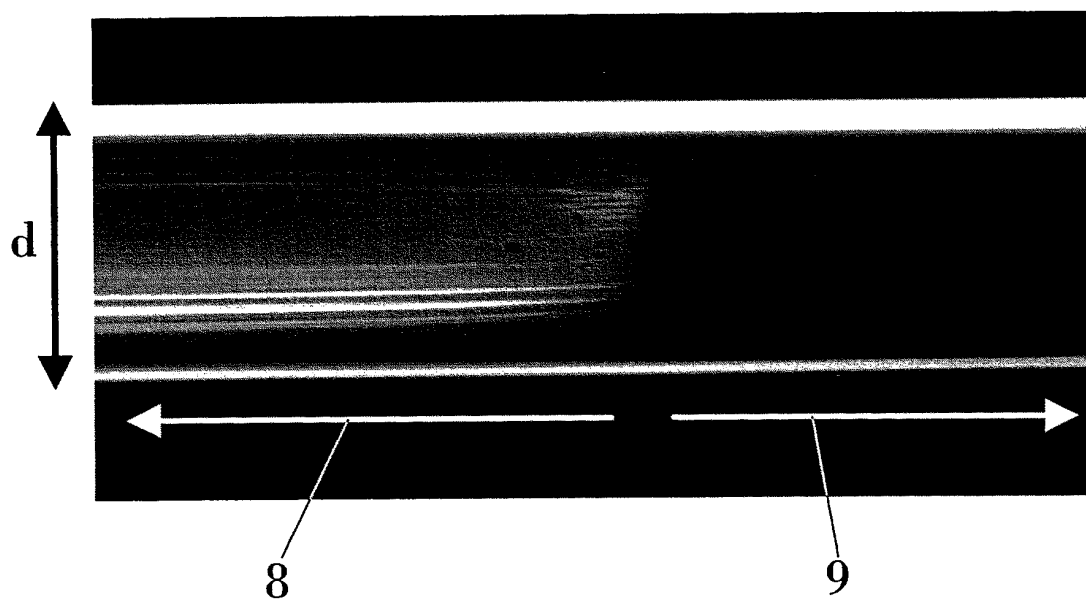


FIG. 2

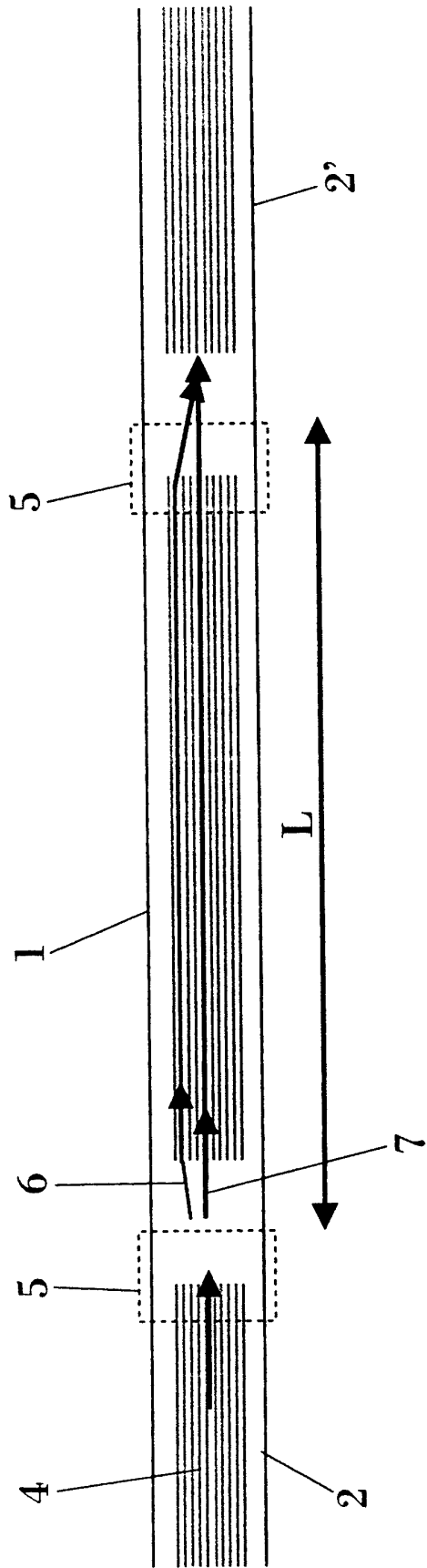


FIG. 3

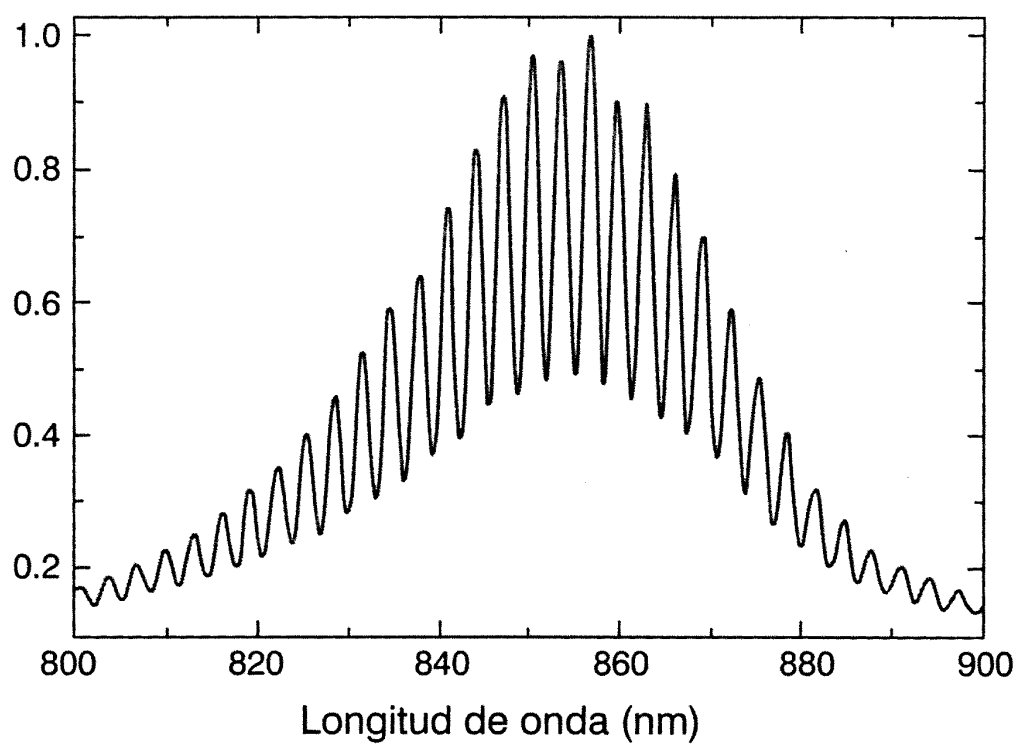


FIG. 4

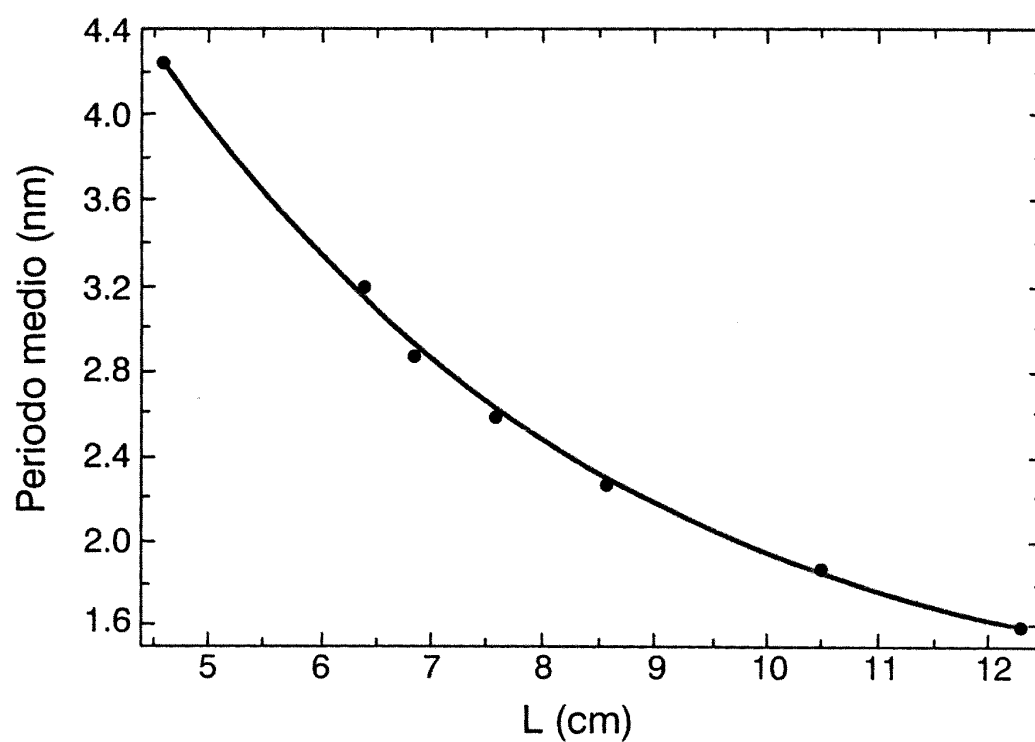


FIG. 5

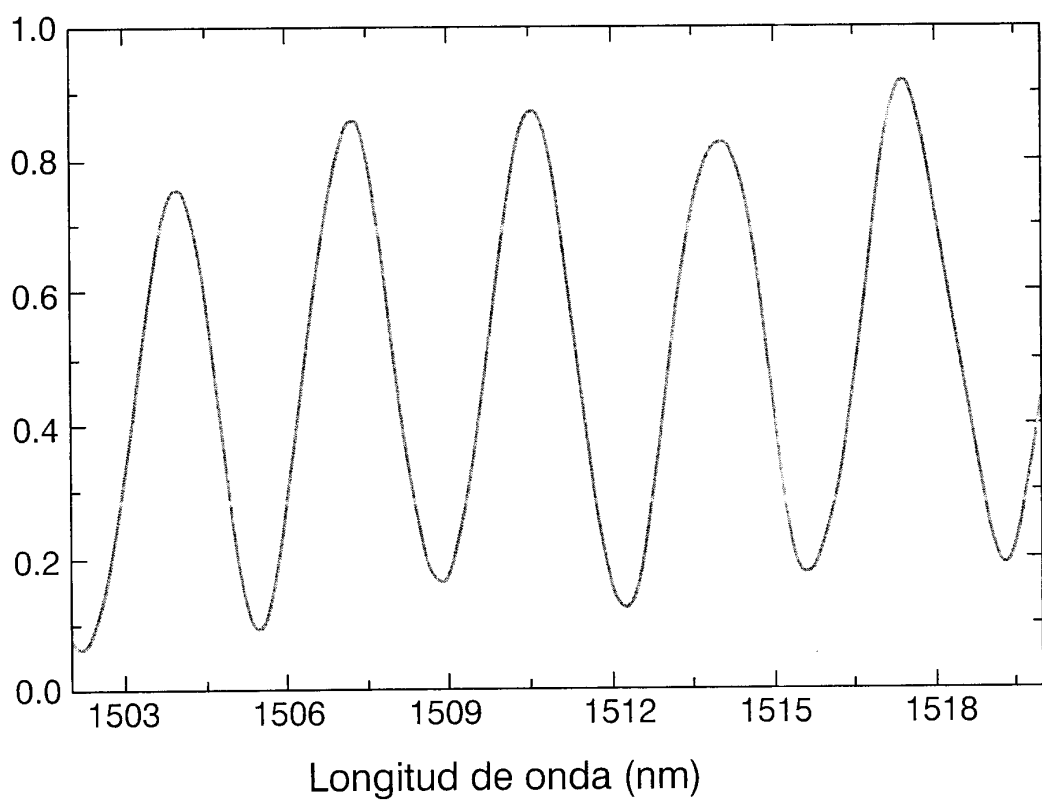


FIG. 6

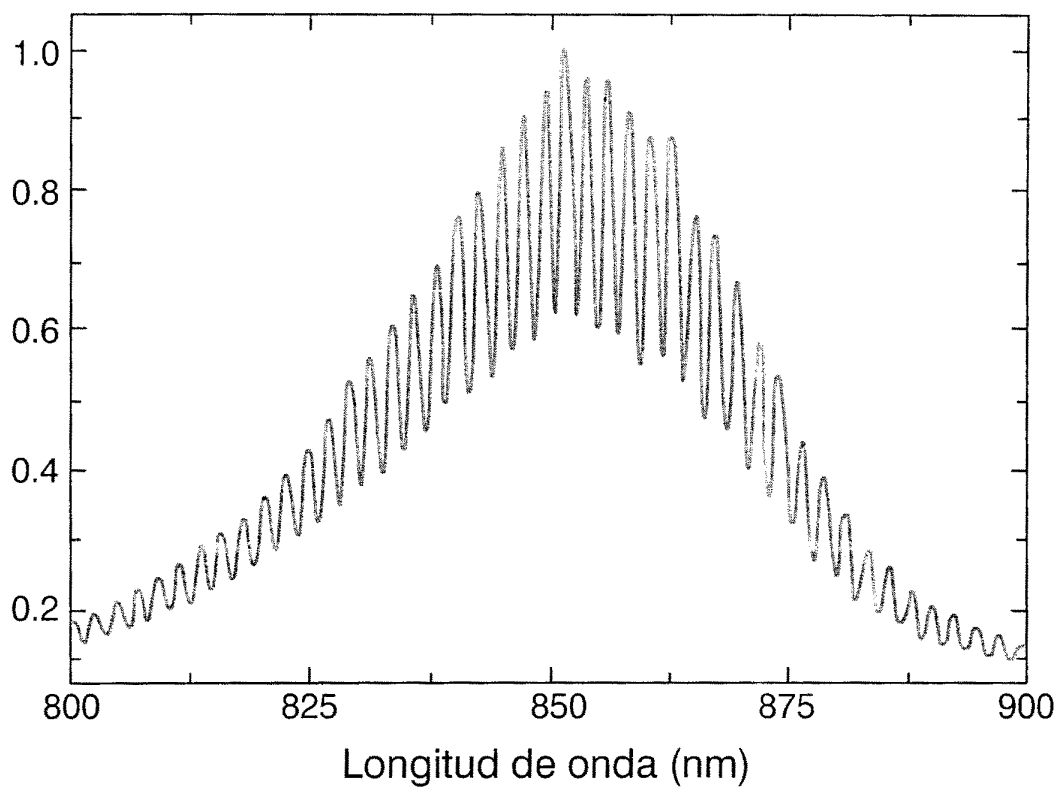


FIG. 7

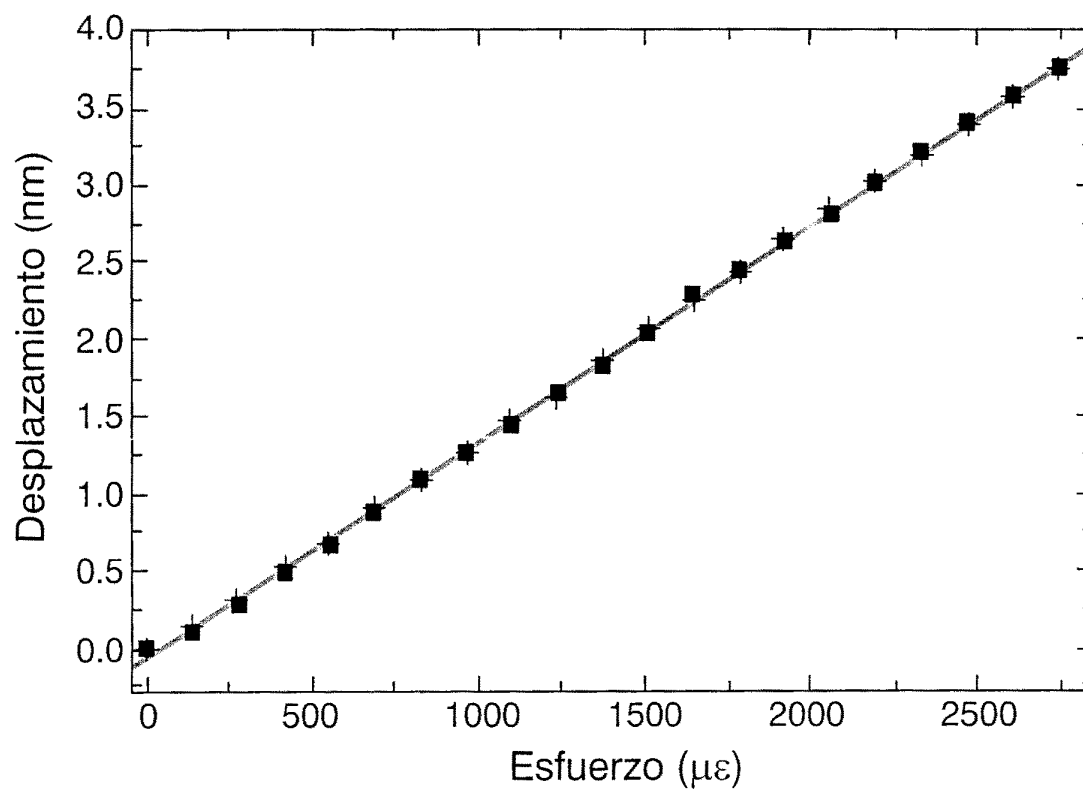


FIG. 8



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ ES 2 332 340

⑫ Nº de solicitud: 200700008

⑬ Fecha de presentación de la solicitud: 26.12.2006

⑭ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑮ Int. Cl.: Ver hoja adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑯ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	LIM, J. et al.: "Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON DC., US, Vol. 29, Nº 4, 15 de febrero de 2004, páginas 346-348, XP002364326, ISSN: 0146-9592.	1-10
A	VILLATORO, J. et al.: "Compact Modal Interferometer Built With Tapered Microstructured Optical Fiber", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Vol. 18, Nº 11, 1 de junio de 2006, páginas 1258-1260, XP003013118, ISSN: 1041-1135.	1-10
A	VILLATORO, J. et al.: "Temperature-independent strain sensor made from tapered holey optical fiber", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON DC., US, Vol. 31, Nº 3, 1 de febrero de 2006, páginas 305-307.	1-10
A	US 20050111804 A1 (BJARKLEV, A. et al.) 26.05.2005, resumen; párrafos [0167]-[0174]; figuras 1-9.	1-10

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe

19.01.2010

Examinador

O. González Peñalba

Página

1/2

CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

G01B 9/02 (2006.01)

G02B 6/28 (2006.01)

G02B 6/255 (2006.01)