

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 982 444**

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.06.2019** E 19382535 (3)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **05.06.2024** EP 3757524

54 Título: **Interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
16.10.2024

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO - EUSKAL
HERRIKO UNIBERTSITATEA (UPV/EHU) (100.0%)
Barrio Sarriena, S/N
48940 Leioa, ES**

72 Inventor/es:

**VILLATORO BERNARDO, AGUSTÍN JOEL y
ZUIBA ZABALLA, JOSEBA ANDONI**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 982 444 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto

5 **Campo técnico**

En general, la presente invención se refiere a dispositivos de fibra óptica y, más particularmente, a un interferómetro que incluye dos segmentos de fibra óptica multinúcleo de diferentes longitudes que están empalmados por fusión, pero rotados entre sí. El interferómetro está destinado a diferentes aplicaciones, que incluyen, detección de curvatura sensible a la dirección, detección de vibración mecánica o para medir cualquier otro parámetro que pueda introducir un cambio en el patrón de interferencia reflejada.

Estado de la técnica

15 Los interferómetros de fibra óptica son dispositivos ampliamente usados como sensores altamente sensibles. Por ejemplo, se han usado interferómetros en óptica para metrología de resolución ultraligera o modulación de luz, entre otras aplicaciones.

20 Las fibras ópticas, ya sean fibras de telecomunicaciones convencionales o fibras especializadas, ofrecen diferentes alternativas para construir interferómetros. Por ejemplo, un segmento corto de fibra de cristal fotónico o fibra multinúcleo (MCF) puede empalmarse por fusión entre fibras ópticas monomodo (véanse, por ejemplo, los documentos EP 1939659 B1, US 9810557 B2). Tales interferómetros pueden usarse como sensores para parámetros físicos tales como tensión, temperatura, vibraciones, flexión, entre otros.

25 La mayoría de los interferómetros de fibra óptica se usan como sensores puntuales. Se pueden colocar varios interferómetros individuales en serie (véase D. Barrera *et al.*, "Low-loss photonic crystal fiber interferometers for sensor networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, págs. 3542 - 3547, 2010 o US 9810557 B2). En estos casos, se decodifica la fase o amplitud de cada interferómetro individual.

30 Se pueden colocar en serie dos interferómetros con períodos cortos y ligeramente diferentes (véase H. Liao *et al.*, "Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach-Zehnder interferometer sensors with modified Vernier-effect," *Opt. Express* 25, 26898-26909, 2017). En este caso, se usa un interferómetro como referencia y el otro interferómetro como sensor. La sensibilidad de dos interferómetros en cascada con las características anteriormente mencionadas aumenta, hasta un orden de magnitud, en comparación con la sensibilidad de un único interferómetro. Sin embargo, son necesarios segmentos largos de fibras ópticas para lograr períodos cortos y son necesarios métodos de fabricación de alta precisión para lograr la diferencia deseada entre los períodos del interferómetro de referencia y de detección. Otra desventaja de dos interferómetros en cascada es la complejidad del patrón de salida (véase H. Zhu *et al.*, "Ultra-high sensitivity optical sensors based on cascaded two Fabry-Perot," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 277, págs. 152-156, 2018) que no es fácil de analizar. Además, el parámetro que se detecta se codifica en un parámetro relativo, por ejemplo, el desplazamiento de la envolvente de la superposición de dos espectros de interferencia.

45 El intervalo de medición de dos interferómetros en cascada es más estrecho que el de un único interferómetro (véase AD Gomes *et al.*, "Multimode Fabry-Perot interferometer probe based on Vernier effect for enhanced temperature sensing," *Sensors*, 19, art. 453, 2019).

Los problemas mencionados asociados con los interferómetros en cascada limitan sus aplicaciones a situaciones específicas únicamente.

50 VILLATORO J ET AL: "Twin Multicore Fiber Interferometers for Precision Sensing" (2019 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS EUROPE & EUROPEAN QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE (CLEO/EUROPE-EQEC), IEEE), página 1, muestra un interferómetro multinúcleo doble para detección de precisión que comprende una sucesión de una sección de una SMF, una primera sección de una fibra de siete núcleos que tiene un núcleo centrado que es un eje de simetría, una sección de una SMF, una segunda sección de una fibra de siete núcleos que tiene un núcleo centrado que es un eje de simetría y que tiene la misma longitud que la primera, y una sección de una SMF, que se interrogan en modo de reflexión.

Descripción de la invención

60 La presente invención está destinada a superar los problemas anteriormente mencionados de interferómetros de fibra óptica en cascada usando MCF con tres núcleos acoplados empalmados entre dos segmentos de fibra óptica monomodo (SMF). El modo fundamental transmitido a través de la SMF provoca la excitación de varios modos en las MCF, más particularmente, varios supermodos, que, a su vez, produce una modulación periódica de la respuesta espectral del interferómetro debido a interferencia multimodo en las MCF.

65 Como se usa generalmente en el presente documento, los supermodos pueden hacer referencia a modos que son

soportados por MCF en los que los núcleos están lo suficientemente cerca como para que la luz guiada pueda acoplarse por interacción evanescente entre los núcleos.

Los cambios en algunos parámetros físicos de interés de un entorno externo en el que se está usando el dispositivo afectarán a la interferencia multimodo, lo que provoca que el espectro se desplace en longitud de onda. Detectando cambios en este desplazamiento en el espectro, se puede realizar una medición precisa de los parámetros físicos de interés.

Un primer objeto de la invención es un interferómetro de MCF compuesto que tiene una sensibilidad más alta que un único interferómetro de MCF. El interferómetro de MCF compuesto comprende un primer segmento (MCF1) de una fibra multinúcleo y un segundo segmento (MCF2) de la misma fibra multinúcleo. La fibra multinúcleo tiene tres núcleos acoplados, con uno de los tres núcleos acoplados ubicado en el centro geométrico de la fibra multinúcleo. El primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo tiene una primera longitud (L1) y el segundo segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo tiene una segunda longitud (L2), siendo la primera longitud (L1) y la segunda longitud (L2) diferentes entre sí. El primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se rotan 180° entre sí y se empalman por fusión. El primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo se empalma por fusión a un primer segmento (SMF1) de una fibra monomodo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se empalma a un segundo segmento (SMF2) de la misma fibra monomodo. Los núcleos ubicados en el centro geométrico de la MCF1 y la MCF2, y los núcleos únicos de la SMF1 y la SMF2 pueden estar alineados axialmente. El extremo libre del segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo está acoplado a un reflector de luz o espejo (M) para reflejar una señal óptica procedente del primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo. El reflector de luz o espejo son dispositivos configurados para reflejar la luz guiada a través de la fibra.

La luz de excitación puede ser proporcionada por una fuente óptica de banda ancha que emite dentro del intervalo de longitud de onda entre, por ejemplo, 1200 a 1600 nm. Preferentemente, la fuente óptica de banda ancha podría ser un LED o un láser sintonizable con emisión pico a 1550 nm. La luz de una fuente de luz de este tipo puede propagarse en el primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo, el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo, el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo hasta que la señal óptica se refleja desde el espejo (M).

En algunas realizaciones, el interferómetro de MCF compuesto está configurado para operar en modo de reflexión.

En algunas realizaciones, los tres núcleos de la MCF están igualmente separados entre sí y están fabricados del mismo material. En realizaciones más preferidas, los tres núcleos acoplados de la fibra multinúcleo están fabricados, por ejemplo, de sílice dopada con germanio, entre otros materiales. Los tres núcleos se colocan en la MCF de manera que forman un triángulo equilátero.

En algunas realizaciones, la apertura numérica de los núcleos de la MCF puede ser sustancialmente idéntica a la apertura numérica del único núcleo de la SMF para reducir las pérdidas de luz transmitida en las zonas de unión entre la SMF y la MCF. Por ejemplo, la apertura numérica de los núcleos de la MCF puede ser 0,14 que es la apertura numérica de las SMF convencionales.

En algunas realizaciones, los tres núcleos acoplados tienen un diámetro de aproximadamente 9 μm y sus centros geométricos están separados entre sí 11 μm aproximadamente.

En algunas realizaciones, la longitud (L1) de cada uno del primer segmento (MCF1) de fibra multinúcleo y la longitud (L2) del segundo segmento (MCF2) de fibra multinúcleo es preferentemente menor de dos centímetros. Por ejemplo, la longitud (L1) del primer segmento (MCF1) de fibra multinúcleo puede ser de 12,20 milímetros, mientras que la longitud (L2) del segundo segmento (MCF2) de fibra multinúcleo puede ser de 11,40 milímetros.

En algunas realizaciones, la SMF es una fibra óptica monomodo convencional.

En algunas realizaciones, el empalme por fusión entre los dos segmentos de MCF y los dos segmentos de SMF se realiza mediante una máquina de empalme por fusión que comprende medios para rotar las fibras ópticas.

Un segundo objeto de la invención es un método para construir un interferómetro de MCF compuesto. El método comprende proporcionar un primer segmento (MCF1) de una fibra multinúcleo que comprende tres núcleos acoplados y tiene una primera longitud (L1). El método también comprende proporcionar un segundo segmento (MCF2) de la misma fibra multinúcleo, teniendo este segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo una segunda longitud (L2). La primera longitud (L1) y la segunda longitud (L2) son diferentes entre sí y, preferentemente, son inferiores a dos centímetros. Uno de los tres núcleos acoplados de la fibra multinúcleo está ubicado en el centro geométrico de la fibra multinúcleo. A continuación, se proporciona un primer segmento (SMF1) y un segundo segmento (SMF2) de una fibra monomodo. Después, el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo, el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo, el primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo y el segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo se empalman por fusión en una relación SMF1-MCF1-MCF2-SMF2 en serie. Los núcleos ubicados en el centro geométrico del primer segmento (MCF1) y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo, y los núcleos únicos

del primer segmento (SMF1) y el segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo pueden estar todos alineados axialmente. El primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se rotan 180° entre sí y un extremo libre del segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo se acopla a un espejo (M) o reflector de luz para reflejar una señal óptica procedente del primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo.

5 Un tercer objeto de la invención es un método de uso de un interferómetro de MCF compuesto. El método comprende probar el interferómetro de MCF compuesto como se ha definido previamente e introducir un modo, por ejemplo, el modo fundamental de la fibra monomodo, que se propaga en el interferómetro de MCF compuesto a través del primer segmento (SMF1) de fibra monomodo. A continuación, se excitan varios supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo y dichos supermodos, después de propagarse en el interferómetro de MCF compuesto y reflejarse en el espejo, se reciben en un espectrómetro.

10 En algunas realizaciones, el cambio de un parámetro seleccionado del entorno externo se mide monitorizando alteraciones en una diferencia de fase de los supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo.

15 En algunas realizaciones, se detecta un cambio en la respuesta espectral de los supermodos recibidos como una función de un cambio en un parámetro seleccionado de un entorno externo en el que el interferómetro de MCF compuesto está dispuesto operativamente.

20 En algunas realizaciones, el parámetro seleccionado es al menos un parámetro seleccionado de un grupo que comprende temperatura, presión, vibraciones, tensión, flexión y cualquier combinación de las mismas. En particular, el parámetro seleccionado que se va a monitorizar usando el interferómetro de MCF compuesto puede ser cualquier parámetro cuyas variaciones puedan afectar a la diferencia de fase entre los supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo.

25 Las siguientes ventajas sustanciales sobre los interferómetros de la técnica anterior se encuentran entre las logradas con el interferómetro de MCF compuesto y los métodos de construcción y uso de dicho interferómetro de MCF compuesto descritos en el presente documento: el interferómetro de MCF compuesto proporciona un patrón de espectro de salida sencillo que resulta de la multiplicación de los patrones de interferencia de dos interferómetros de MCF de longitudes L1 y L2, respectivamente; el análisis del espectro resultante es sencillo ya que tiene un máximo bien definido; el intervalo de medición del interferómetro compuesto es amplio; y la sensibilidad del interferómetro compuesto se amplifica y es mayor que la de un único interferómetro. También proporciona un diseño sencillo y eficaz.

30 Breve descripción de los dibujos

35 Para completar la descripción y para proporcionar un mejor entendimiento de la invención, se proporciona un conjunto de dibujos. Dichos dibujos forman una parte integral de la descripción e ilustran una realización de la invención, que no debería interpretarse como que restringe el alcance de la invención, sino simplemente como un ejemplo de cómo puede llevarse a cabo la invención. La invención está definida por las reivindicaciones adjuntas.

Los dibujos comprenden las siguientes figuras:

40 La Figura 1 muestra una vista en sección de una fibra óptica multinúcleo (MCF) de ejemplo usada para fabricar el interferómetro de MCF compuesto.

45 La Figura 2 muestra una vista esquemática de un interferómetro de MCF compuesto de ejemplo en el que los dos segmentos de MCF se rotan 180° entre sí.

50 La Figura 3 muestra varios espectros de reflexión obtenidos para dos interferómetros de MCF individuales de ejemplo con estructuras SMF-MCF-SMF y para el interferómetro de MCF compuesto de la Figura 2.

55 La Figura 4 muestra una configuración de ejemplo para usar el interferómetro de MCF compuesto de ejemplo mostrado en la Figura 2 para medir la curvatura o vibraciones en un elemento o superficie.

60 La Figura 5 muestra patrones de espectro de salida de ejemplo observados para el interferómetro de MCF compuesto en la configuración de la Figura 4 cuando el elemento o superficie está curvado hacia abajo (parte superior izquierda) y hacia arriba (parte superior derecha), y un gráfico de ejemplo (inferior) que representa las curvas de calibración para ambas direcciones de curvaturas.

65 La Figura 6 muestra un gráfico de ejemplo (superior) que representa la potencia monitorizada en función del tiempo cuando el interferómetro de MCF compuesto se curva hacia abajo y hacia arriba y un gráfico (inferior) que representa la curva de calibración para ambas direcciones de curvaturas.

La Figura 7 muestra un gráfico de ejemplo que representa la posición en longitud de onda del espectro de reflexión en

función del tiempo de un elemento vibratorio.

Descripción detallada de la invención

5 La Figura 1 muestra una vista en sección de una MCF 100 de ejemplo usada para fabricar el interferómetro de MCF compuesto. La MCF 100 tiene tres núcleos acoplados e igualmente espaciados 101-103 que forman un triángulo equilátero. Uno de los núcleos acoplados 101 está ubicado en el centro geométrico de la MCF 101. Los tres núcleos 101-103 tienen una forma sustancialmente hexagonal. Los tres núcleos acoplados 101-103 pueden estar fabricados de sílice dopada con germanio, entre otros materiales, y tener un diámetro de aproximadamente 9 μm. El centro geométrico de cada uno de los tres núcleos acoplados 101-103 puede estar separado entre sí aproximadamente 11 μm.

15 La Figura 2 muestra una vista esquemática de un interferómetro de MCF compuesto 200 de ejemplo en el que los dos segmentos de MCF se rotan 180° entre sí. El interferómetro de MCF compuesto 200 comprende un primer segmento (MCF1) 201 de la MCF que tiene una primera longitud (L1) y un segundo segmento (MCF2) 202 de la misma MCF que tiene una segunda longitud (L2), y, preferentemente, siendo cada una de dichas longitudes (L1, L2) de menos de 2 cm. La primera longitud (L1) y la segunda longitud (L2) son diferentes entre sí. En un ejemplo de este tipo, el primer segmento (MCF1) 201 de la MCF tiene una longitud de 12,20 milímetros mientras que el segundo segmento (MCF2) 202 de la misma MCF tiene una longitud de 11,40 milímetros.

20 El primer segmento (MCF1) 201 de la MCF y el segundo segmento (MCF2) 202 de la MCF se rotan 180° entre sí y se empalman entre sí.

25 El primer segmento (MCF1) 201 de la MCF se empalma a un primer segmento (SMF1) 203 de una SMF y el segundo segmento (MCF2) 202 de la MCF se empalma a un segundo segmento (SMF2) 204 de la misma SMF. La SMF es una fibra óptica monomodo convencional. El extremo libre del segundo segmento (SMF2) 204 de la SMF está acoplado a un espejo (M) 205 para reflejar una señal óptica procedente del primer segmento (SMF1) 204 de la SMF. Los núcleos 206 ubicados en el centro geométrico del primer segmento (MCF1) 201 y el segundo segmento (MCF2) 202 de la MCF y los núcleos únicos 207 del primer segmento (SMF1) 203 y del segundo segmento (SMF2) 204 de la SMF están todos alineados axialmente. Los dos segmentos MCF1 201 y MCF2 202 son de la misma MCF y los dos segmentos SMF1 y SMF2 son de la misma SMF. La apertura numérica de los tres núcleos de la MCF y del único núcleo de la SMF es sustancialmente la misma, por ejemplo, 0,14.

35 Para un mejor entendimiento del funcionamiento del interferómetro de MCF compuesto 200 de la Figura 2, se lleva a cabo un primer análisis del interferómetro de MCF compuesto 200 cuando L2=0, en otras palabras, cuando no hay MCF2 202 y la longitud de MCF1 201 es L1. En un caso de este tipo, el interferómetro de MCF compuesto 200 se convierte en un interferómetro de MCF individual con una estructura de SMF1-MCF1-SMF2 donde la longitud de MCF1 es L1. Debido a la simetría axial y al hecho de que el interferómetro de MCF individual se excita con el modo de SMF fundamental, únicamente se excitan dos supermodos en la MCF1. Los supermodos tienen diferentes índices de refracción efectivos que se pueden indicar como "n1" y "n2". La diferencia de fase acumulada entre los supermodos cuando pasan la longitud L1 de MCF1 es $\Delta\phi_1 = 2\pi L1\Delta n/\lambda$, donde "λ" es la longitud de onda de la fuente óptica y $\Delta n = n_1 - n_2$. Por lo tanto, la intensidad de transmisión del interferómetro de MCF individual que tiene un único segmento de MCF (MCF1) cuya longitud es L1 puede expresarse como:

45
$$I_{1T} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\phi_1). \tag{1}$$

En la ecuación (1), "I1" y "I2" son, respectivamente, las intensidades de los supermodos, supermodo 1 y supermodo 2 respectivamente, generados dentro de MCF1.

50 A continuación, se lleva a cabo un segundo análisis del interferómetro de MCF compuesto 200 cuando L1 = 0, en otras palabras, cuando no hay MCF1 201 y la longitud del segmento de MCF2 202 es L2. En un ejemplo de este tipo, la diferencia de fase será $\Delta\phi_2 = 2\pi L2\Delta n/\lambda$ y la intensidad de transmisión del interferómetro de MCF individual también puede expresarse mediante la ecuación (1), pero con $\Delta\phi_2$ en lugar de $\Delta\phi_1$.

55 Además, se lleva a cabo el análisis del espectro de reflexión de un interferómetro de MCF individual con un único segmento de MCF, que tiene una estructura de SMF1-MCF1 (o MCF2)-SMF2 cuando la SMF2 en el extremo final tiene un espejo (M) en su cara (véase la Figura 2). En este caso, la estructura del interferómetro de MCF individual puede considerarse como dos estructuras de SMF-MCF-SMF en serie. El espectro de transmisión de dos interferómetros de MCF individuales en serie es el producto de las transmisiones individuales. Por lo tanto, la intensidad de reflexión de una única estructura de SMF-MCF-SMF con L1 (o L2) es simplemente $I_{1R} = I_{2T}^2$ (o $I_{2R} = I_{1T}^2$). A continuación, considerando las dos estructuras de SMF-MCF-SMF en serie y suponiendo que la longitud del segmento de MCF es L1, "I1R" puede expresarse como:

65
$$I_{1R} = [I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\phi_1)]^2. \tag{2}$$

En el ejemplo de la Figura 2, cuando la longitud de la MCF1 201 es L1 y la longitud de la MCF2 202 es L2=L1+L0 (o

L2= L1-L0), el interferómetro de MCF compuesto 200 puede considerarse como dos interferómetros de MCF combinados con una estructura de SMF1-MCF1-MCF2-SMF2 en serie. En este caso, uno de los dos interferómetros de MCF combinados se desplazará en fase con respecto al otro, con la condición de que L0>0. La diferencia de fase absoluta entre los dos interferómetros de MCF combinados será $\delta\varphi=2\pi L_0\Delta n/\lambda$. Para evitar la superposición de los máximos de los interferómetros individuales, se considera que " $\delta\varphi$ " es menor que " π ". Bajo esta condición, los dos interferómetros de MCF combinados se desplazarán en fase menos de un período cuando:

$$0 < L_0 < \lambda/(2\Delta n). \quad (3)$$

En interferencia de supermodo, la expresión $\lambda/(2\Delta n)$ se denomina el periodo del intercambio de potencia entre los núcleos acoplados de MCF [L. Szostkiewicz *et al.*, OL Vol. 41, págs. 3759, 2016]. En [J. Villatoro *et al.*, Art. ThE68, OFS26, 2018], se demostró que para la fibra de tres núcleos mostrada en la Figura 1, un período de este tipo, o L0, es de 1600 μm aproximadamente.

Bajo las condiciones indicadas anteriormente, la intensidad de reflexión de un interferómetro de MCF individual que tiene una estructura de SMF-MCF-SMF con longitud L2 puede expresarse como:

$$I_{2R} = [I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\varphi_1 + \delta\varphi)]^2. \quad (4)$$

Para el interferómetro de MCF compuesto 200 mostrado en la Figura 2 en el que dos segmentos de MCF de longitud L1 y L2 se colocan en serie y en el que el interferómetro se interroga en modo de reflexión, el reflejo del interferómetro de MCF compuesto 200 puede expresarse como:

$$I_R = (I_{1T}^2)(I_{2T}^2). \quad (5)$$

Esto significa que el interferómetro de MCF compuesto 200 es equivalente a dos interferómetros de MCF, con una estructura de SMF1-MCF1-MCF2-SMF2 y una estructura de SMF2-MCF2-MCF1-SMF1, respectivamente, colocadas en serie.

La sensibilidad "S" de un dispositivo de detección se define como la tasa de cambio de la cantidad que se puede medir (intensidad de luz, desplazamiento del patrón de interferencia, etc.) como una función del estímulo "X" que se está detectando. Por lo tanto, la sensibilidad de un único interferómetro de MCF de longitud L1 cuando opera en modo de transmisión, es sencilla: $S_{1T} = \partial I_{1T} / \partial X$. Si la longitud del interferómetro es L2, la sensibilidad se puede expresar como $S_{2T} = \partial I_{2T} / \partial X$. En las últimas expresiones, I_{1T} o I_{2T} puede describirse de acuerdo con la ecuación (1).

La sensibilidad S_R del interferómetro de MCF compuesto descrito en la Figura 2 a un estímulo particular "X" se puede calcular diferenciando la ecuación (5). Por lo tanto, se obtiene:

$$S_R = M_1 S_{1T} + M_2 S_{2T}. \quad (6)$$

En la ecuación (6), $M_1 = 2I_{1T}(I_{2T}^2)$ y $M_2 = 2I_{2T}(I_{1T}^2)$. Esto significa que la sensibilidad del interferómetro de MCF compuesto a un estímulo particular "X" es la suma de las sensibilidades amplificadas de los interferómetros individuales. Por lo tanto, la sensibilidad del interferómetro de MCF compuesto es mayor que la sensibilidad de un interferómetro de MCF individual e incluso mayor que la sensibilidad de dos interferómetros de MCF individuales colocados en serie.

El interferómetro de MCF compuesto 200 de ejemplo puede usarse para medir cambios en cualquier parámetro cuyas variaciones pueden afectar a la diferencia de fase entre los supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo. Por ejemplo, el interferómetro 200 de MCF compuesto de ejemplo puede usarse para medir temperatura, vibraciones, flexión, tensión, etc., de un objeto al que está acoplado el interferómetro 200 de compuesto MCF de ejemplo monitorizando alteraciones en una diferencia de fase de los supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y en el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo.

La Figura 3 muestra varios espectros de reflexión 301-303 obtenidos para dos interferómetros de MCF individuales de ejemplo con estructuras SMF-MCF-SMF y para el interferómetro de MCF compuesto de la Figura 2.

En particular, la línea discontinua corresponde al espectro de reflexión 301 de un primer interferómetro de MCF individual de ejemplo en el que L1=12,20 mm y L2=0. Por lo tanto, la estructura del primer interferómetro de MCF de ejemplo es SMF1-MCF1-SMF2. La línea discontinua corresponde al espectro de reflexión 302 de un segundo interferómetro de MCF individual de ejemplo en el que L2=11,40 mm y L1=0. Por lo tanto, la estructura del segundo interferómetro de MCF de ejemplo es SMF1-MCF2-SMF2. El área sombreada con línea continua corresponde al espectro de reflexión 303 obtenido para el interferómetro de MCF compuesto de la Figura 2 en el que L1=12,20 y L2=11,40 y los dos segmentos de MCF se empalmaron por fusión y rotaron 180° con respecto entre sí. Por lo tanto, la Figura 3 muestra los espectros de reflexión normalizados 301-303 de interferómetros de MCF en tres casos diferentes. Debería observarse que, el espectro 303 para el interferómetro de MCF compuesto es equivalente a cuando

se multiplican los espectros 301-302 mostrados en líneas discontinuas y discontinuas. El espectro 303 del interferómetro de MCF compuesto muestra un pico único y estrecho. Obsérvese que, la posición en longitud de onda de un pico de este tipo del espectro 303 del interferómetro de MCF compuesto está entre los máximos de los espectros 301-302 de los interferómetros de MCF individuales.

5 Las ventajas del interferómetro de MCF compuesto como se describe en el presente documento en comparación con los interferómetros de MCF individuales son, entre otras, una mayor sensibilidad, como se describe por la ecuación (6), que un interferómetro de MCF individual y un espectro de reflexión que muestra un pico único y estrecho que es fácil de rastrear y analizar.

10 La Figura 4 muestra una configuración 400 de ejemplo para usar el interferómetro de MCF compuesto 401 de ejemplo mostrado en la Figura 2 para medir la curvatura o vibraciones en un elemento o superficie alargada 402. En tal configuración 400, "h" es la profundidad de flexión del elemento o superficie 402 y "d" la distancia fija entre los dos puntos de fijación o soportes 403 a los que está acoplado el elemento 402. Aunque en tal ejemplo únicamente se ilustra la curvatura cóncava aplicada al elemento o superficie alargada 402, puede medirse cualquier otro tipo de curvatura, tal como curvatura convexa o curvatura angular, aplicada a diferentes objetos con diferentes geometrías con el interferómetro de MCF compuesto 401 de ejemplo.

20 El interferómetro de MCF compuesto 401 descrito en la Figura 2 se coloca sobre el elemento 402 a una distancia sustancialmente igual entre los dos soportes 403. Por lo tanto, cuando se aplica una fuerza de flexión al elemento 402, esta fuerza de flexión también se aplica al interferómetro de MCF compuesto 402. El primer segmento (SMF1) 404 de la fibra monomodo está acoplado a un acoplador de fibra óptica (FOC) 405 de tal manera que se transmite la luz generada por el SLED 406 al interferómetro de MCF compuesto 401 y se recibe la luz reflejada desde el espejo (M) del interferómetro de MCF compuesto 401 en el detector 407, por ejemplo, un espectrómetro. La distribución de potencia transmitida a través del FOC 405 depende de la longitud de onda y la polarización de la fuente óptica. Tales FOC se pueden fabricar de diferentes maneras, por ejemplo, fusionando térmicamente fibras para que sus núcleos entren en contacto íntimo.

30 El detector 407 está conectado a medios informáticos (no mostrados en esta figura) para monitorizar, analizar y representar el patrón de espectro de salida generado. Debe entenderse que, la configuración 400 de ejemplo representada en la Figura 4 puede incluir componentes adicionales y que, algunos de los componentes descritos en el presente documento pueden eliminarse y/o modificarse sin alejarse del alcance de la configuración 400 de ejemplo.

35 El diodo emisor de luz SLED 406 tiene su pico de emisión a 1550 nm.

40 La Figura 5 muestra patrones de espectro de salida de ejemplo observados cuando el interferómetro de MCF compuesto 401 en la configuración 400 de la Figura 4 cuando el elemento o superficie 402 está curvado hacia abajo (gráfico superior izquierdo) y hacia arriba (gráfico superior derecho). La Figura 5 también muestra un gráfico de ejemplo (inferior) que representa las curvas de calibración para ambas direcciones de curvaturas.

45 El gráfico superior izquierdo resume los espectros de reflexión medidos por el interferómetro de MCF compuesto 401 en función de la curvatura C, que se define como $C = 12h/d^2$, "h" es la desviación del elemento o superficie 402, y "d" es la separación entre los puntos de fijación 403, cuando se aplica una curvatura cóncava al elemento o superficie 402. Se observa que, para una "h" más alta se mide una reflexión más baja por el interferómetro de MCF compuesto 401 y viceversa. Dicha curvatura cóncava aplicada al elemento o superficie 402 también provoca un desplazamiento a longitudes de onda más largas del espectro reflejado.

50 El gráfico superior derecho resume la reflexión medida por el interferómetro de MCF compuesto 401 como una función de C, que se define como $C = 12h/d^2$, "h" es la desviación del elemento o superficie 402, y "d" es la separación entre los puntos de fijación 403, cuando se aplica una curvatura convexa al elemento o superficie 402. También se observa que, para una "h" más baja se mide una reflexión más baja por el interferómetro de MCF compuesto 401 y viceversa. Dicha curvatura convexa aplicada al elemento o superficie 402 provoca un desplazamiento a longitudes de onda más cortas del espectro reflejado.

55 El espectro de salida del interferómetro de MCF compuesto descrito en este punto consiste en un único pico cuya amplitud o posición en longitud de onda (un parámetro absoluto) es fácil de rastrear y correlacionar con un parámetro a detectar (medir), por ejemplo, la desviación del elemento en el ejemplo de las Figuras 4 y 5. El gráfico inferior mostrado en la Figura 5 representa las curvas de calibración para ambas direcciones de curvaturas. Cuando no hay curvatura, el desplazamiento se considera como 0 pm. Los puntos son valores medidos de curvatura y las líneas continuas y discontinuas se ajustan a los datos. Se observa que, el interferómetro de MCF compuesto proporciona información tanto de la magnitud de la curvatura, así como de la orientación de la curvatura.

60 La longitud de onda monitorizada es la posición de los máximos de las representaciones mostradas en la Figura 5, en otras palabras, la posición de longitud de onda de los picos mostrados en los gráficos superiores de la Figura 5 que corresponden sustancialmente a los 1550 nm del SLED 406.

65

- La Figura 6 muestra una representación (gráfico superior) que representa la potencia óptica monitorizada como una función del tiempo cuando el interferómetro de MCF compuesto 401 de la Figura 4 está curvado hacia abajo (curvatura cóncava) y hacia arriba (curvatura convexa). El gráfico inferior mostrado en la Figura 6 representa la curva de calibración para ambas direcciones de curvatura. Los puntos sólidos son los cambios de potencia medidos (ΔP) para diferentes valores de curvatura con respecto a la potencia óptica (P) cuando no se aplica curvatura en el interferómetro. Los escalones en cada caso fueron $0,0266 \text{ m}^{-1}$, en otras palabras, para el valor de $\Delta P/P$, la curvatura del elemento o superficie 402 aumentó (curvatura convexa) o disminuyó (curvatura cóncava) en $0,0266 \text{ m}^{-1}$. La longitud de onda monitorizada fue de 1550 nm desde el SLED 406.
- 10 Puede observarse que el interferómetro compuesto proporciona de nuevo información de la magnitud y dirección de la curvatura.
- La capacidad del interferómetro compuesto para monitorizar vibraciones se demostró con la configuración 401 de la Figura 4. Se aplicó una curvatura cóncava al elemento 402 y se le permitió oscilar libremente. La posición de la longitud de onda pico del espectro de reflexión del interferómetro compuesto se monitorizó en función del tiempo. La línea continua de la Figura 7 muestra la posición de tal longitud de onda pico frente al tiempo. Cuando el elemento 402 dejó de vibrar, la longitud de onda pico del espectro de reflexión del interferómetro compuesto volvió a la línea de base. El recuadro de la Figura 7 muestra la transformada rápida de Fourier (FFT) de la representación de la longitud de onda frente al tiempo. La posición del pico de FFT es a $18,67 \text{ Hz}$. Esto significa que, por medio de la FFT es posible conocer la frecuencia de oscilación de un elemento al que está unido el interferómetro de MCF compuesto.
- 20 Los interferómetros de MCF compuestos como se describen en el presente documento son sensibles a variaciones mínimas de la longitud física de los segmentos de la MCF usados para fabricarlos. También son sensibles a los cambios de índice de refracción de los modos que participan en la interferencia dentro de la MCF y a la flexión o vibraciones. En cualquier caso, la diferencia de fase entre los modos de interferencia (supermodos dentro de los segmentos de MCF) cambia y hace que el espectro de interferencia reflejado se desplace, lo que facilita el rastreo de cualquier cambio en el entorno del interferómetro de MCF compuesto y la correlación de dichos cambios con un parámetro a detectar.
- 25 El interferómetro de MCF compuesto descrito en este punto es sensible a la curvatura y a la dirección de la curvatura, así como a las vibraciones. Estos pueden considerarse como ejemplos de los posibles parámetros que esta invención puede monitorizar, pero hay otros parámetros que pueden cambiar los supermodos que se propagan en la MCF y cambiar la posición o amplitud del espectro reflejado. La clave para la detección del interferómetro de MCF compuesto es modificar la diferencia de fase de los supermodos que participan en la interferencia.
- 30 En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (tales como "que comprende", etc.) no deberían entenderse en un sentido exclusivo, es decir, estos términos no deberían interpretarse como que excluyen la posibilidad de lo que se describe y define pueda incluir elementos, etapas, etc., adicionales.
- 35 La invención evidentemente no está limitada a las realizaciones específicas descritas en el presente documento, sino que también abarca cualesquiera variaciones que puedan considerarse por un experto en la materia (por ejemplo, con respecto a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro del alcance general de la invención como se define en las reivindicaciones.
- 40

REIVINDICACIONES

1. Un interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto, que comprende:
 un primer segmento (MCF1) de una fibra multinúcleo que comprende tres núcleos acoplados y que tiene una primera longitud (L1), en donde uno de los tres núcleos acoplados está ubicado en el centro geométrico de la fibra multinúcleo; un segundo segmento (MCF2) de la misma fibra multinúcleo que tiene una segunda longitud (L2), siendo la primera longitud (L1) y la segunda longitud (L2) diferentes entre sí; en donde el primer segmento (MCF1) y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se rotan 180° entre sí y se empalman juntos;
 en donde el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo se empalma a un primer segmento (SMF1) de una fibra monomodo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se empalma a un segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo; y en donde un extremo libre del segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo está acoplado a un reflector de luz o espejo (M) para reflejar una luz guiada procedente del primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo.
2. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de la reivindicación 1, en donde el interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto está configurado para operar en modo de reflexión.
3. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los tres núcleos de la fibra multinúcleo están igualmente espaciados entre sí y están fabricados del mismo material.
4. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de la reivindicación 3, en donde los tres núcleos acoplados de la fibra multinúcleo están fabricados de sílice dopada con germanio.
5. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los tres núcleos acoplados tienen un diámetro de 9 µm y están separados entre sí 11 µm.
6. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la longitud (L1) del primer segmento (MCF1) de fibra multinúcleo y la longitud (L2) del segundo segmento (MCF2) de fibra multinúcleo es menor que dos centímetros.
7. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los núcleos ubicados en el centro geométrico del primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y del segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo, y los núcleos únicos del primer segmento (SMF1) de una fibra monomodo del segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo están todos alineados axialmente.
8. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde una apertura numérica de los núcleos de la fibra multinúcleo y una apertura numérica del núcleo de la fibra monomodo es sustancialmente la misma.
9. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la fibra monomodo es una fibra óptica monomodo convencional.
10. El interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el empalme por fusión entre los dos segmentos de fibra multinúcleo y los dos segmentos de fibras monomodo se realiza mediante una máquina de empalme por fusión que comprende medios para rotar las fibras ópticas.
11. Un método para construir un interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto, comprendiendo el método:
 proporcionar un primer segmento (MCF1) de una fibra multinúcleo que comprende tres núcleos acoplados y tiene una primera longitud (L1), en donde uno de los tres núcleos acoplados está ubicado en el centro geométrico de la fibra multinúcleo;
 proporcionar un segundo segmento (MCF2) de la misma fibra multinúcleo que tiene una segunda longitud (L2), siendo la primera longitud (L1) y la segunda longitud (L2) diferentes entre sí;
 proporcionar un primer segmento (SMF1) y un segundo segmento (SMF2) de una fibra monomodo; y empalmar por fusión el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo, el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo, el primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo y el segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo en una relación SMF1-MCF1-MCF2-SMF2 en serie, en donde el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo se rotan 180° entre sí y en donde un extremo libre del segundo segmento (SMF2) de la fibra monomodo está acoplado a un reflector de luz o espejo (M) para reflejar una señal óptica procedente del primer segmento (SMF1) de la fibra monomodo.
12. Un método de uso de un interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto, comprendiendo el método:
 probar el interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10;
 introducir un modo que se propaga en el interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto a través del primer

segmento (SMF1) de fibra monomodo;
excitar supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo; y
5 recibir, en un espectrómetro, los supermodos después de propagarse en el interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto y reflejarse en el reflector de luz o espejo.

13. El método de uso del interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de acuerdo con la reivindicación 12, que comprende medir el cambio de un parámetro seleccionado del entorno externo monitorizando alteraciones en una
10 diferencia de fase de los supermodos que se propagan en el primer segmento (MCF1) de la fibra multinúcleo y en el segundo segmento (MCF2) de la fibra multinúcleo.

14. El método de uso del interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de acuerdo con las reivindicaciones 12 o 13, que comprende detectar un cambio en la respuesta espectral de los supermodos recibidos en función de un
15 cambio en un parámetro seleccionado de un entorno externo en el que el interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto está dispuesto operativamente.

15. El método de uso del interferómetro de fibra óptica multinúcleo compuesto de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 13 o 14, en donde el parámetro seleccionado es al menos uno de un grupo que comprende temperatura, vibraciones, presión, tensión, flexión y cualquier combinación de los mismos.

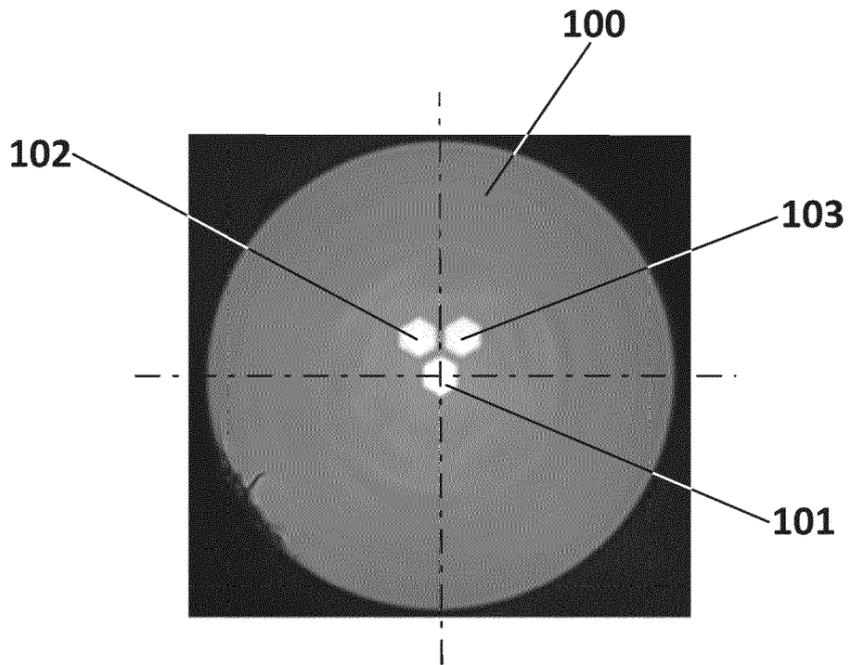


FIG. 1

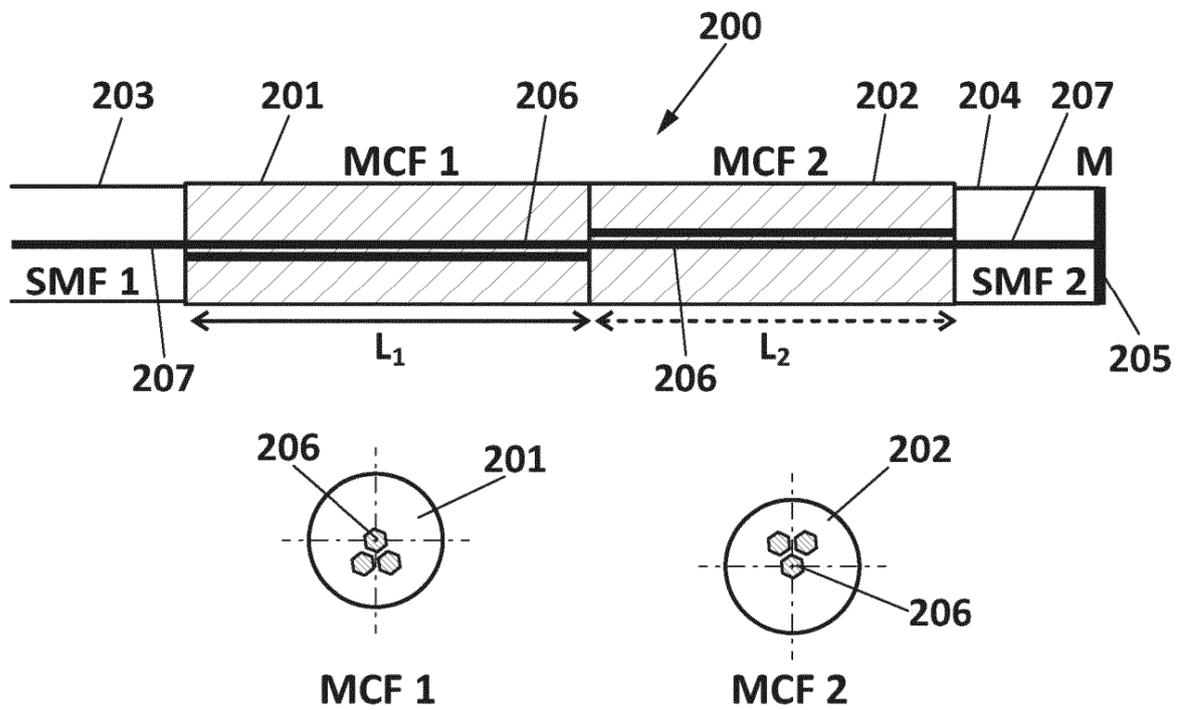


FIG. 2

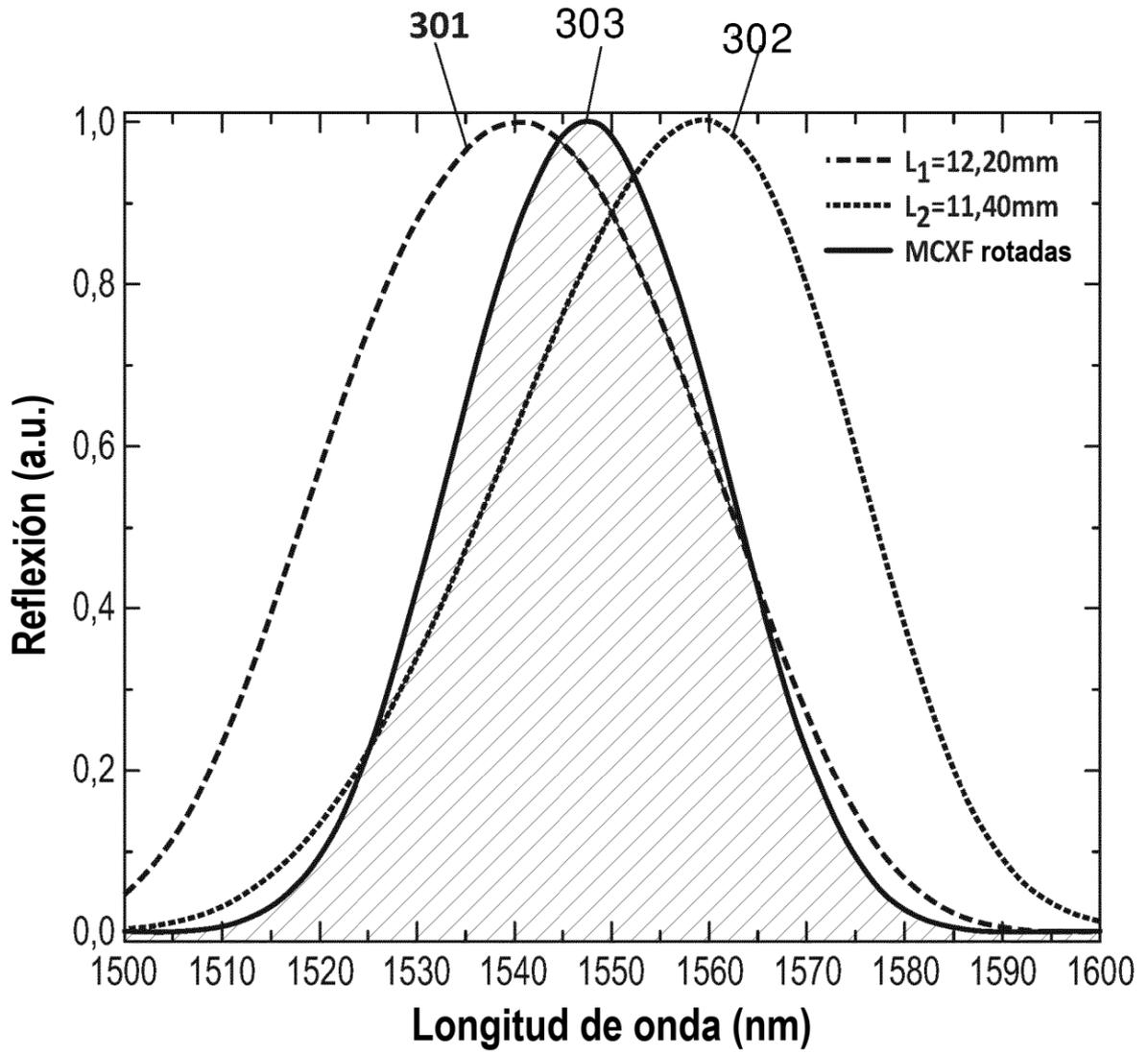


FIG. 3

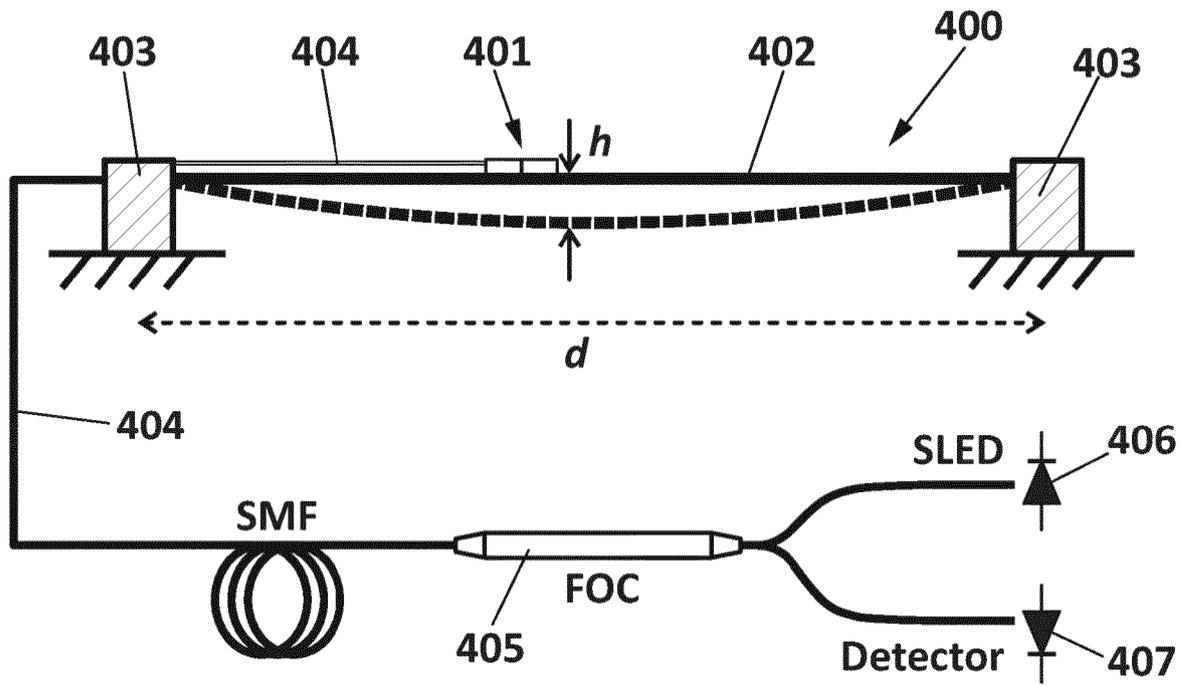


FIG. 4

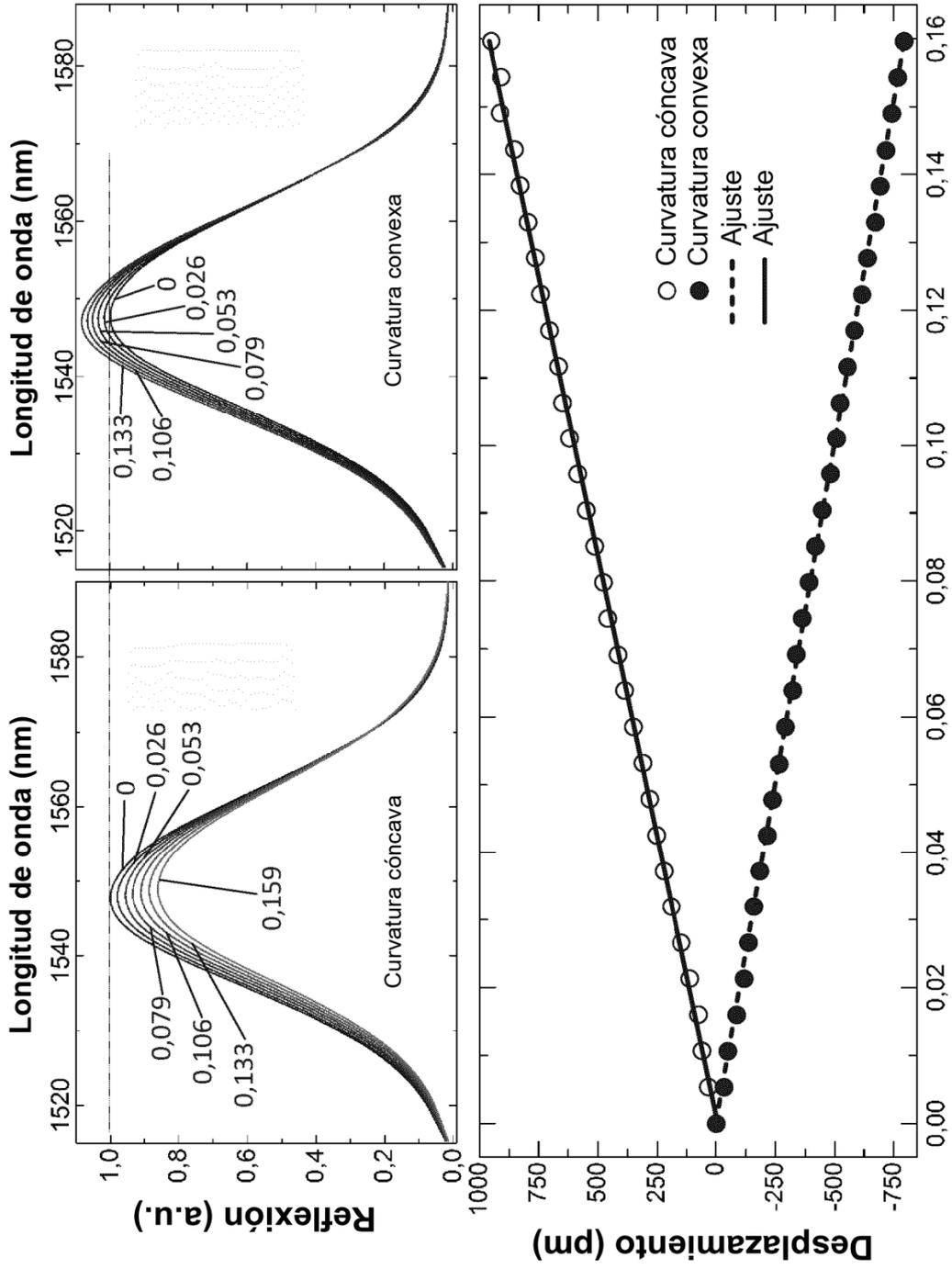


FIG. 5

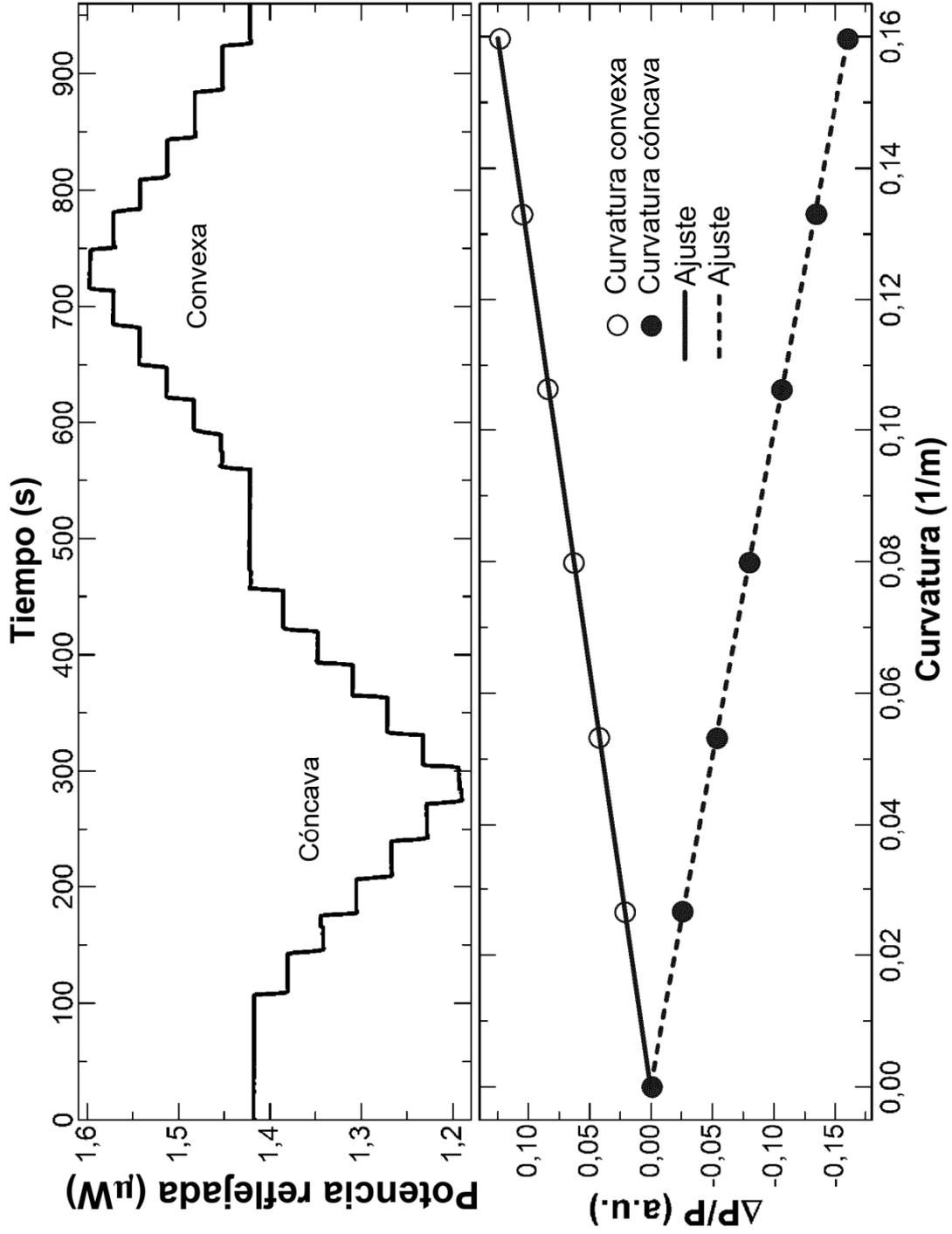


FIG. 6

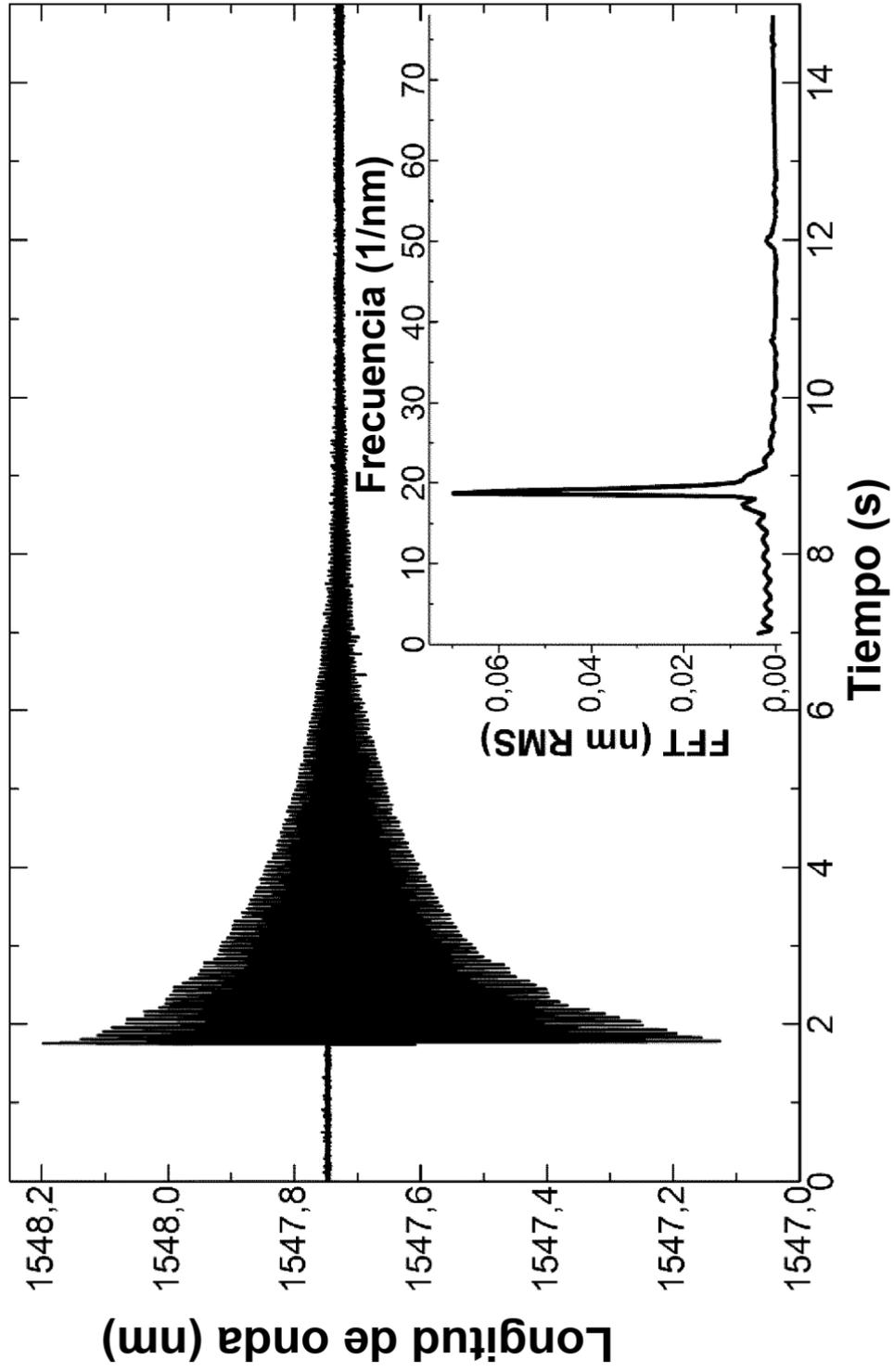


FIG. 7