

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 539 007**

51 Int. Cl.:

G02B 5/30 (2006.01)

G01B 9/02 (2006.01)

G01K 11/00 (2006.01)

G01D 5/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.09.2005 E 05784123 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.02.2015 EP 1803004**

54 Título: **Sensor óptico que usa interferometría de baja coherencia**

30 Prioridad:

20.09.2004 US 610950 P
01.11.2004 US 976863

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.06.2015

73 Titular/es:

OPSENS INC. (100.0%)
2014, CYRILLE-DUQUET SUITE 125
QUEBEC QC G1N 4N6, CA

72 Inventor/es:

DUPLAIN, GAÉTAN

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 539 007 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

Sensor óptico que usa interferometría de baja coherencia

5 Campo de la invención

Esta descripción se refiere a un sensor óptico basado en interferometría de baja coherencia (LCI) para medir una cantidad física. En particular, se refiere a un sensor óptico basado en LCI basado en una disposición de interferómetros en tándem con un interferómetro de lectura de polarización.

10

Antecedentes de la técnica

El interferómetro se conoce como una herramienta de medición óptica muy precisa para medir una cantidad física mediante cambios inducidos por el mesurando en la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro. Cuando se usa una fuente de luz de banda estrecha, la longitud de coherencia de la fuente generalmente es mayor que la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro y, por lo tanto, la medición sufre una ambigüedad de fase 2π , debido a la naturaleza periódica de las franjas del interferograma, que pueden restringir muy severamente las aplicaciones de medición. El problema de ambigüedad en fase 2π se evita usando una fuente de luz con longitud de coherencia corta. En este caso, las franjas del interferograma se localizan estrechamente en una región con una diferencia en la longitud de la trayectoria de manera que la variación de la diferencia en la longitud de la trayectoria puede determinarse sin la ambigüedad 2π localizando el pico de la franja o el pico de la envolvente del interferograma. Este tipo de interferometría se conoce como interferometría de luz blanca o de baja coherencia (LCI).

15

20

25

Los sistemas ópticos basados en interferometría de baja coherencia han sido estudiados ampliamente y se han desarrollado satisfactoriamente en aplicaciones comerciales tales como tomografía de coherencia óptica (OCT) y perfilometría de baja coherencia (LCP), que se han convertido en herramientas de medición convencionales. Se obtiene información de una imagen en sección transversal bidimensional usando OCT o información de la profundidad de la superficie usando LCP formando un interferómetro entre las superficies de ensayo y de referencia y explorando la diferencia en la longitud de la trayectoria entre ellas a través de un intervalo de valores. Estos sistemas de medición óptica están dirigidos en su mayoría a aplicaciones de tipo laboratorio o similares cuando las condiciones medioambientales son una preocupación menor.

30

35

Los sistemas de detección óptica basados en LCI y dirigidos a aplicaciones industriales y otras aplicaciones de tipo distinto de laboratorio han emergido también como productos comerciales pero aún no son herramientas de medición convencionales y hay solo unos pocos proveedores comerciales. Para estos tipos de aplicaciones se requiere que la parte detectora del sistema de medición esté significativamente separada de la parte de acondicionamiento o lectura de señal. En este caso, el sensor óptico basado en LCI necesita dos interferómetros normalmente conectados con una fibra óptica: 1) el interferómetro de detección, que está sometido a la magnitud física que se va a medir y 2) el interferómetro de lectura que se usa para medir los cambios inducidos por el mesurando en la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección. Esta disposición denominada de interferómetros en tándem generalmente es más compleja que la de la configuración de un único interferómetro.

40

45

Es probable que los sensores ópticos dirigidos a aplicaciones industriales y otras aplicaciones de tipo distinto de laboratorio se expongan a condiciones medioambientales severas. Por lo tanto, es importante que el interferómetro de detección se diseñe para que sea sensible a un tipo de mesurando y que limite los efectos falsos de otros mesurandos. Debe producir también una relación constante e idealmente lineal entre la diferencia en la longitud de la trayectoria y el mesurando. De la misma manera, el interferómetro de lectura debe ser muy estable, es decir, su calibrado interno debe permanecer válido durante un largo periodo de tiempo. También debe proporcionar una lectura constante con una dependencia mínima de factores ambientales tales como temperatura, vibración etc. Estos requisitos industriales "obligatorios" añadidos a las restricciones económicas evitan que muchas de las tecnologías de detección óptica desarrolladas en los laboratorios alcancen el mercado de los sensores industriales y otros mercados distintos del laboratorio.

50

55

Ya se ha propuesto un número de sensores ópticos para medir una magnitud física. La Patente de Estados Unidos Nº 4.140.393 de Cetas, febrero 1979 y la Patente de Estados Unidos Nº 4.598.996 Taniuchi, julio 1986 desvelan el uso de diferentes cristales birrefringentes en una configuración de interferómetro de dos haces como el elemento detector para medir la temperatura. Usan cristales tales como LiTaO_3 , LiNbO_3 , BaTiO_3 y $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ para formar un interferómetro de detección de polarización y miden la intensidad de la luz en la salida del interferómetro, que varía sinusoidalmente debido a los cambios inducidos por la temperatura en la birrefringencia del cristal. Su sistema de detección óptica está basado en una fuente de luz de banda estrecha de manera que su técnica de medición sufre una ambigüedad de fase 2π y, por lo tanto, ofrece un intervalo de medición limitado.

60

65

La Patente de Estados Unidos Nº 5.255.068 de Emo et al., octubre 1993, usa cristales similares y una disposición de interferómetros de detección distinta de la de Cetas y Taniuchi para medir la temperatura, pero su sistema de

detección óptica aprovecha las propiedades de baja coherencia de la fuente de luz que usan. Sin embargo, el espectro de la fuente de luz, modulado de acuerdo con la birrefringencia dependiente de temperatura del cristal, se registra usando un espectrómetro dispersivo que se sabe que tiene un menor rendimiento óptico que un interferómetro. Puesto que la señal resultante se obtiene en el dominio de la frecuencia o de la longitud de onda en lugar de en el dominio del tiempo o espacial, usan un método de procesamiento de señales por Transformada de Fourier Discreta que puede consumir tiempo, sin mencionar el coste y complejidad de usar una configuración de espectrómetro dispersivo. Además, se sabe que los cristales mencionados anteriormente tienen una fuerte dependencia de su birrefringencia, lo que puede reducir gravemente la precisión del método de procesamiento de señales por transformada de Fourier.

También se conoce en la técnica el documento de Bosselmann y Ulrich titulado "High-accuracy position-sensing with fiber-coupled white-light interferometers" publicado en OFS'84, 5-7 septiembre, 1984, en el que describe el uso de un interferómetro de Michelson como interferómetro de lectura en una configuración basada en LCI. La diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de Michelson se explora desplazando uno de sus dos espejos y las franjas del interferograma se registran en la salida del interferómetro usando un único fotodetector. La localización del pico de la franja en el interferograma se determina a partir de los valores medidos tomados en diferentes posiciones exploradas del espejo móvil. Debido a sus piezas ópticas móviles, la estabilidad mecánica es el punto débil de este sistema, sin mencionar el problema de tener que medir la posición del espejo móvil con alta precisión.

La Patente de Estados Unidos Nº 5.392.117 de Belleville et al., febrero, 1995, la Patente de Estados Unidos Nº 5.349.439 de Graindorge et al., septiembre 1994 y el documento de Duplain et al. "Absolute Fiber-Optic Linear Position and Displacement Sensor" publicado en OSA Technical Digest Series, Vol. 16, 1997 describen el uso de un interferómetro de Fizeau para la medición de la diferencia en la longitud de la trayectoria de un interferómetro de detección. Su sistema de sensor óptico basado en LCI consiste en registrar las franjas del interferograma en la salida de un interferómetro de lectura de Fizeau usando una serie lineal de fotodetectores y localizar la posición del pico de la franja en el interferograma. El interferómetro de Fizeau, aunque no tiene partes móviles, está fabricado de una cuña con espacio de aire o una cuña óptica sólida que no es fácil de producir por que se requiere el uso de métodos de deposición de película fina muy complejos o el uso de métodos de fabricación y montaje de componentes ópticos con tolerancias severas respecto a espesor, alineación óptica, estabilidad del material y calidad óptica. Además, el interferómetro de Fizeau, aunque puede fabricarse con una baja finura, sigue siendo aún un interferómetro de múltiples haces en cuyo caso, la visibilidad de las franjas, cuando se usa en la configuración LCI, generalmente es menor que la de un interferómetro de dos haces.

La Patente de Estados Unidos Nº 4.814.604 y la Patente de Estados Unidos Nº 4.867.565 expedidas a Lequime, así como el documento de Mariller y Lequime titulado "Fiber-Optic White-Light birefringent temperature sensor" publicado en SPIE Proceedings, Vol. 798, 1987, desvelan el uso de un dispositivo de detección óptica basado en LCI que incluye un interferómetro de detección de polarización similar a la configuración desvelada en las Patentes de Cetay y Taniuchi. Su sistema de detección óptica basado en LCI consiste en registrar el patrón de franjas en la salida de un interferómetro de lectura de polarización usando una serie lineal de fotodetectores o un fotodetector único. Su interferómetro de lectura de polarización es un conjunto bastante complejo de diferentes elementos birrefringentes colocados entre dos polarizadores. Los elementos birrefringentes comprenden al menos una placa de cristal con dos prismas birrefringentes elementales apilados juntos a lo largo de una cara, de manera que forman un prisma de Wollaston o un prisma de Wollaston modificado. Estos elementos birrefringentes se montan en formas variadas del compensador de Babinet o el compensador de Soleil. Estos tipos de configuraciones producen dispositivos de montaje complejo y experimentan importantes inconvenientes. En su configuración más sencilla, el plano de localización de las franjas está dentro del prisma de Wollaston y está inclinado hacia la cara de salida del prisma de Wollaston. Esta situación requiere una óptica de corrección para formar una imagen de las franjas en la superficie del fotodetector. Sin embargo, la inclinación del plano de localización produce un error de enfoque residual en la superficie del fotodetector y, por lo tanto, conduce a una reducción en el contraste de la franja a menos que la fuente de luz tenga un alto grado de coherencia espacial. Para evitar esta situación, Lequime propone algunas modificaciones en su configuración usando un segundo prisma de Wollaston y una placa de semionda acromática, pero a expensas de aumentar la complejidad del dispositivo.

Debido a la alta dispersión de birrefringencia del cristal usado en su interferómetro de detección (y posiblemente en el interferómetro de lectura) el interferograma puede distorsionarse severamente, comprometiendo por lo tanto la localización del pico de la envolvente o el pico de la franja. Proponen dos soluciones para superar este problema. Una solución consiste en realizar su interferómetro de lectura del mismo material birrefringente que el del interferómetro de detección. Tal solución es probable que aumente la sensibilidad del interferómetro de lectura a las influencias medioambientales y, por tanto, no se desea para aplicaciones de base industrial. Otra solución propuesta es usar una fuente de luz con un espectro más estrecho donde el efecto de dispersión pueda obviarse, pero esta solución es a expensas de ensanchar la región de la diferencia en la longitud de la trayectoria de las franjas, lo que reduce la precisión del pico de la envolvente o la localización del pico de la franja.

El documento de patente EP 1 278 050 desvela también un interferómetro de polarización.

Sumario

5 La invención proporciona un sistema de sensor óptico sencillo y robusto destinado a aplicaciones industriales y otras y basado en interferometría de baja coherencia usando la disposición de interferómetros en tándem, para medir una cantidad física tal como, aunque sin limitación, la temperatura, la presión, la tensión, el desplazamiento.

La presente invención proporciona un interferómetro de polarización como se define en la reivindicación 1.

10 La invención proporciona también un sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem, basado en interferometría de baja coherencia, para medir una cantidad física. El sistema comprende un sistema de iluminación que genera una intensidad de la luz caracterizada por una longitud de coherencia. El sistema comprende también un interferómetro de detección, que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor mayor que la longitud de coherencia, para recibir la intensidad de la luz y generar una señal luminosa del sensor como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor, en el que la diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor puede modificarse por una variación de la cantidad física. El sistema comprende también un interferómetro de lectura de polarización, que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura y está basado en una configuración de interferómetro de dos haces, que recibe la señal luminosa del sensor y que genera, en una localización de salida y como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura, una señal luminosa de lectura, siendo el interferómetro de lectura de polarización el interferómetro de polarización de acuerdo con la reivindicación 1.

25 Ventajosamente, la diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor del sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem comprende una trayectoria en un primer material birrefringente y la cuña birrefringente está fabricada de un segundo material birrefringente, en el que el primer y segundo materiales birrefringentes tienen propiedades de dispersión similares, para proporcionar de esta manera un sistema de sensor óptico de dispersión compensada.

30 Ventajosamente, la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura del interferómetro de lectura de polarización comprende una diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura que varía espacialmente como una función de un eje de lectura, la señal luminosa de lectura comprende una señal distribuida espacialmente a lo largo del eje de lectura y la localización de detección está distribuida espacialmente a lo largo del eje de lectura para proporcionar de esta manera un interferograma distribuido en la localización de detección.

35 Ventajosamente, el sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem comprende además una serie de fotodetectores lineales situados en la localización de detección, para recibir el interferograma distribuido y generar una señal de fotodetector correspondiente como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura. El sistema comprende también una unidad de procesamiento de señales para determinar la cantidad física a partir de la señal del fotodetector, proporcionando de esta manera, con el interferograma distribuido mencionado anteriormente y la serie de fotodetectores lineales, un sistema de sensor óptico estático para la medición de la cantidad física.

45 En un ejemplo no reivindicado, el sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem puede ser un interferómetro de exploración donde la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura varía como una función del tiempo por exploración como una función del tiempo y a lo largo del eje de lectura, una posición de la cuña birrefringente. El sistema puede comprender además un único fotodetector situado en la localización del detector, para recibir la señal luminosa de lectura explorada y generar una señal de fotodetector correspondiente.

50 La invención también proporciona un método, basado en interferometría de baja coherencia, como se define por la reivindicación 24.

Ventajosamente, el método comprende además proporcionar una base de datos de calibrado que relaciona la diferencia de longitud en la trayectoria del sensor con la cantidad física.

55 Ventajosamente, la cuña birrefringente única del interferómetro de polarización comprende un cristal de MgF₂.

Descripción de los dibujos

60 Para que la invención pueda entenderse fácilmente, las realizaciones de la invención se ilustran a modo de ejemplo en los dibujos adjuntos.

La Figura 1 es una vista esquemática de un sensor óptico, de acuerdo con una realización, con un interferómetro de detección que funciona en modo reflexión:

65 La Figura 2 es una vista esquemática de un sensor óptico, de acuerdo con la realización de la Figura 1, con un interferómetro de detección que funciona en modo transmisión;

La Figura 3A es una vista esquemática de un interferómetro de lectura del sensor óptico de la Figura 1 o la Figura 2 con una lente cilíndrica;

5 La Figura 3B es una vista esquemática de un interferómetro de lectura del sensor óptico de la Figura 1 o la Figura 2 con un espejo cilíndrico;

La Figura 4 es una vista esquemática parcial del interferómetro de lectura del sensor óptico de la Figura 1 o de la Figura 2;

10 La Figura 5 es una vista esquemática parcial de un interferómetro de lectura de acuerdo con una realización alternativa;

La Figura 6 es un interferograma obtenido en la salida del sensor óptico de la Figura 1 o la Figura 2, cuando se usa con una fuente de luz eficaz que tiene una densidad espectral de potencia con forma gaussiana;

15 La Figura 7 es una vista esquemática de un interferómetro de lectura de acuerdo con un ejemplo no reivindicado;

La Figura 8 es un gráfico de la curva de dispersión de birrefringencia diferencial normalizada de un sensor óptico de acuerdo con una realización de la presente invención;

20 La Figura 9, curva (a), es un gráfico del interferograma obtenido con el interferómetro de lectura de polarización fabricado de una cuña de cristal de MgF_2 y con un interferómetro de detección de polarización fabricado con una placa de cristal con corte x de LiB_3O_5 , de acuerdo con una realización de la presente invención; y

25 La Figura 9, curva (b) es un gráfico del interferograma obtenido con el interferómetro de lectura de polarización fabricado de una cuña de cristal de MgF_2 y con un interferómetro de detección de polarización basado en cristal de $LiNbO_3$ de acuerdo con una realización de la presente invención.

30 Otros detalles de la invención y sus ventajas resultarán evidentes a partir de la descripción detallada incluida a continuación.

Descripción detallada

35 En la siguiente descripción de las realizaciones, las referencias a los dibujos adjuntos son a modo de ilustración de un ejemplo mediante el cual la invención se va a llevar a la práctica. Se entenderá que pueden hacerse otras realizaciones sin alejarse del alcance de la invención reivindicada.

40 Hay dos configuraciones básicas para la disposición de sensor óptico de interferómetros en tándem, que son las configuraciones de reflexión y transmisión. El sensor óptico de la configuración de reflexión mostrada en la Figura 1 comprende un interferómetro de detección **10** usado en modo reflexión y que tiene su diferencia en la longitud de la trayectoria sensible a la cantidad física medida. Preferentemente, el interferómetro es un interferómetro de dos haces **26**, o una buena aproximación de este tipo de interferómetro, tal como un interferómetro de Fabry-Perot de baja finura. Un conjunto de fibras ópticas **17** y un acoplador óptico **18** conectan el interferómetro de detección **10** a la fuente de luz **11** y al interferómetro de lectura **12**. La luz **22** emitida por la fuente de luz se envía, mediante el acoplador óptico **18** y las fibras ópticas **17**, hacia el interferómetro de detección **10**. Dado un interferómetro de detección de división de amplitud de dos haces **10** con pérdidas iguales en los dos haces y suponiendo un campo óptico estacionario con un alto grado de coherencia espacial en la entrada del interferómetro de detección, la densidad espectral de potencia $I_s(\nu)$ en la salida del interferómetro de detección se modula espectralmente de acuerdo con la ley de interferencia espectral y se da mediante la siguiente ecuación:

50

$$I_s(\nu) = K_s I_{en}(\nu) \left[1 + \cos(2\pi\nu\tau_s(M) + \theta_s) \right] = K_s I_{en}(\nu) \left[1 + \cos\left(2\pi\nu \frac{\delta_s(M)}{c} + \theta_s\right) \right] \quad (1)$$

55 donde ν es la frecuencia de la luz, τ_s y δ_s ($\delta_s = c \tau_s$) son respectivamente el retraso en el tiempo relativo y la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección **10** que varían como una función de la magnitud del mesurando M , c es la velocidad de la luz al vacío, $I_{en}(\nu)$ es la densidad espectral de potencia del flujo de luz en la entrada **23** del interferómetro de detección **10**, K_s y θ_s son constantes numéricas que dependen del tipo de interferómetro de detección y su configuración (modo de reflexión o transmisión).

60 La luz en la salida del interferómetro de detección **10** se recoge por la misma fibra óptica **17** y se envía hacia el interferómetro de lectura **12**. El flujo de luz **24** que sale de la fibra óptica **17** se alimenta al interferómetro de lectura **12** usando óptica de enfoque **20**. El interferómetro de lectura **12** es un interferómetro de polarización estático basado en la configuración de interferómetro de dos haces, que tiene una variación de la longitud en la trayectoria distribuida espacialmente a lo largo de una dirección y que comprende una única cuña **13** fabricada de un cristal birrefringente que tiene, en una realización, baja dependencia de la frecuencia de su birrefringencia y baja dependencia de la

temperatura de su birrefringencia; un polarizador lineal **15** colocado delante de la cuña birrefringente **13**, que descompone la luz no polarizada en dos componentes de polarización lineal ortogonales; y un analizador lineal **16** colocado detrás de la cuña birrefringente **13**, con un eje de polarización orientado paralelo o perpendicular al eje de polarización del polarizador **15**, que recombina los dos componentes de polarización lineales ortogonales de la luz transmitida en la salida de la cuña birrefringente **13** de manera que puedan interferir. El haz de luz **25** pasa a través del interferómetro de lectura y alcanza la superficie del dispositivo fotodetector **19**. Una unidad de procesamiento de señal **21** analiza el interferograma obtenido a partir de la distribución de la intensidad de la luz medida por el dispositivo fotodetector **19** y determina la localización del pico de la envolvente o la localización del pico de la franja del interferograma y convierte esta localización en una diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección **10** y, en consecuencia, en el valor medido.

La Figura 2 representa la configuración de transmisión del sensor óptico. Comprende un interferómetro de detección **10** usado en el modo de transmisión y que tiene su diferencia en la longitud de la trayectoria sensible a la cantidad física medida. En una realización, el interferómetro es un interferómetro **26** de dos haces, o una buena aproximación de este tipo de interferómetro, tal como el interferómetro de Fabry-Perot de baja finura. Un conjunto de fibras ópticas **17** conecta el interferómetro de detección **10** a la fuente de luz **11** y al interferómetro de lectura **12**. La ecuación (1) se cumple también para este tipo de configuración. Existen diferentes variantes de las configuraciones de reflexión y transmisión y no se dan en este documento, puesto que son evidentes para un experto en la materia.

En la Figura 3A y Figura 3B se ilustra una realización de la óptica de enfoque del interferómetro de lectura **12**. La óptica de enfoque **20** es un sistema de formación de imágenes anamórficas simples fabricado de una única lente cilíndrica **20A** o un espejo cilíndrico **20B**. Este proyecta una imagen de la cara de salida **27** de la fibra óptica sobre la superficie de la serie de fotodetectores pero en la dirección vertical únicamente (dirección y en la figura). En la otra dirección, el haz de luz se dispersa sobre la longitud de la serie haciendo uso de la divergencia del haz de luz que sale de la fibra óptica. Es preferible que la cuña birrefringente **13**, el analizador lineal **16** y el dispositivo fotodetector **19** estén unos cerca de otros pero a la vez alejados de la entrada de la fibra óptica (no mostrada explícitamente en las Figuras 3A y 3B) en esta condición y limitando el ángulo de la cuña birrefringente a pequeños valores (como se analizará posteriormente), la división del haz de luz en la superficie del fotodetector y debido a la doble refracción en la cuña birrefringente se mantiene muy pequeña y no reduce significativamente la visibilidad de las franjas. Otra ventaja de esta configuración es que el tamaño del haz de luz en la entrada del interferómetro de lectura **12** es bastante pequeño en comparación con la cuña birrefringente **13**, de manera que el haz de luz de entrada puede verse como una buena aproximación de esta fuente puntual, al menos en la dirección x. Se sabe bien a partir de la teoría de interferencia que las franjas no están localizadas con una fuente puntual y, por tanto, la visibilidad de las franjas no se ve afectada por el doble efecto de refracción en la cuña. Para los expertos en la materia, es obvio que hay pluralidades de sistemas de formación de imágenes anamórficas diferentes que son distintos que los dos descritos en este documento que pueden usarse en el interferómetro de lectura **12**.

La Figura 4 muestra un diagrama de una realización del interferómetro de lectura **12**. Para facilidad de comprensión, la cuña está orientada de manera que su primera superficie está situada en paralelo al plano x-y y su borde está en paralelo al eje y de la figura. El espesor $d(x)$ de la cuña **32** varía como una función lineal de la posición del eje x de la siguiente manera:

$$d(x) = x \tan(W) + d_0 \quad (2)$$

donde W es el ángulo de la cuña **33** y d_0 es el espesor de la cuña en la posición $x = 0$. La cuña **13** está fabricada de un cristal que presenta anisotropía óptica; es decir, la velocidad de la luz a través del cristal depende de la dirección de propagación y de la dirección de vibración. En una realización, el cristal de la cuña tiene una de sus secciones principales paralela a la superficie delantera de la cuña **35** y tiene uno de los ejes de vibración principales **14** de esa sección principal perpendicular al borde **31** de la cuña **13**. Con tal orientación, los ejes de vibración principales y por tanto los índices principales del cristal birrefringente corresponden a los ejes x, y y z de la Figura 4. La cuña **13** preferentemente está fabricada de un cristal uniaxial con índices de refracción principales n_e y n_o . Sin perder la generalidad, los índices de refracción en la dirección x e y se seleccionan arbitrariamente como $n_x \equiv n_e$ y $n_y = n_z \equiv n_o$, de manera que la birrefringencia del cristal es $B = (n_e - n_o) = (n_x - n_y)$.

El polarizador lineal **15** tiene su eje de transmisión **30** preferentemente orientado a un ángulo $P = \pm 45$ grados con respecto al eje de vibración principal mencionado anteriormente que corresponde al eje x de la figura. El analizador lineal **16** tiene su eje de transmisión **34** preferentemente orientado paralelo o perpendicular al eje de transmisión **30** del polarizador **15**, de manera que su ángulo de orientación preferentemente es $A = P$ o $A = P \pm 90$ grados.

El flujo de luz **24** recibido desde el interferómetro de detección **10** se alimenta al interferómetro de lectura **12** y se polariza linealmente a un ángulo P con respecto al eje x. Una vez que entra por la cara delantera de la cuña birrefringente, la luz polarizada linealmente se descompone en componentes de polarización ortogonales x e y y que se propagan con diferentes velocidades de fase debido a la diferencia en los índices de refracción n_e y n_o considerando solo la luz normalmente incidente, la diferencia en la longitud de la trayectoria δ_r y, en consecuencia, el retraso en el tiempo relativo τ_r entre los dos componentes ortogonales x e y en la superficie trasera de la cuña se da

mediante la siguiente ecuación:

$$\delta_r = c\tau_r = B d(x) = (n_e - n_o)[x \tan(W) + d_o] \quad (3)$$

5 que muestra la dependencia lineal de δ_r (y τ_r) con la posición x . Puede apreciarse el hecho de que dado un error en el espesor de cuña Δd debido a las limitaciones inherentes en las tolerancias de fabricación óptica, el error en la diferencia en la longitud en la trayectoria relativo $\Delta\delta$ es igual a $B \Delta d$, mientras que el de un interferómetro de Fizeau es igual a $2 \Delta d$. En la práctica esto significa que, dado un límite aceptable del error en la diferencia en la longitud de la trayectoria, el límite de tolerancia en el espesor impuesto para la cuña birrefringente es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que el de la cuña de un interferómetro de Fizeau. Por lo tanto, la cuña birrefringente es mucho más fácil de producir que la cuña de Fizeau. Esto mismo es cierto si se compara la tolerancia de fabricación del ángulo de la cuña birrefringente con el de la cuña de Fizeau.

15 La Figura 5 muestra otra realización de la cuña birrefringente. Una placa birrefringente **60** con espesor **61** h , preferentemente fabricada del mismo material de cristal que la cuña **13**, está situada delante o detrás de la cuña birrefringente **13**. Esta placa birrefringente **60** se usa para aumentar o disminuir el punto medio del intervalo operativo de la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura. El cristal de la placa está orientado para tener dos de sus tres ejes principales de vibración **62** paralelos a la superficie de la placa. En el caso donde la placa **60** está hecha de un cristal uniaxial, sus ejes de vibración principales x e y , como se ha definido anteriormente, son paralelos a la superficie de la placa y su orientación en este plano puede ajustarse a dos posiciones: una en la misma orientación y una en la orientación transversal con respecto a los ejes de vibración principales cristalinos de la cuña birrefringente **13**. En el caso de que la placa **60** y la cuña **13** se fabriquen del mismo cristal uniaxial, la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura es:

$$\delta_r = c\tau_r = \begin{cases} B(d(x) + h) = (n_e - n_o)[x \tan(W) + (d_o + h)] & \text{para orientación paralela} \\ B(d(x) - h) = (n_e - n_o)[x \tan(W) + (d_o - h)] & \text{para orientación transversal} \end{cases} \quad (4)$$

25 La ecuación anterior muestra que la adición de una placa birrefringente de espesor h proporciona un medio sencillo para aumentar o disminuir el punto medio del intervalo operativo de la diferencia en la longitud de la trayectoria sin tener que usar una cuña diferente. La placa birrefringente **60** puede unirse directamente a la cuña birrefringente **13** o puede separarse de esta de manera que pueda cambiarse o retirarse fácilmente.

35 La elección del cristal birrefringente de la cuña es muy importante y está basada en la combinación óptica de tres propiedades del cristal: la magnitud de la birrefringencia, la dispersión o la dependencia de la frecuencia de la birrefringencia y la dependencia de la temperatura de las propiedades del cristal. Dado un intervalo de diferencia en la longitud de la trayectoria adecuado para la aplicación de detección, la birrefringencia B del cristal debe ser suficientemente grande por lo demás para que la cuña birrefringente forme un componente voluminoso con un ángulo de cuña grande. Por otro lado, la dispersión de la birrefringencia debe permanecer pequeña puesto que puede distorsionar severamente el interferograma. La distorsión depende principalmente de la magnitud de la segunda derivada de longitud de onda de la birrefringencia $\partial^2 B / \partial \lambda^2$. Es obvio que la dependencia de la temperatura $\partial \delta_r / \partial T$ de la diferencia en la longitud de la trayectoria de la cuña debe ser también pequeña. La ecuación (3) muestra que $\partial \delta_r / \partial T$ depende de la dependencia de la temperatura $\partial B / \partial T$ de la birrefringencia y de la dependencia de la temperatura $\partial d / \partial T$ del espesor de la cuña. Se puede definir un coeficiente de temperatura normalizado χ para la dependencia de la temperatura de la diferencia en la longitud de la trayectoria de la siguiente manera:

$$\chi \equiv \frac{1}{\delta_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial T} = \left(\frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial T} + \alpha \right) \quad (5)$$

45 donde α es el coeficiente de expansión térmica ($1 / d \partial d / \partial T$) del cristal en la dirección perpendicular al plano x -y de la Figura 4. Se ha encontrado que los cristales de fluoruro de magnesio (MgF_2) y cuarzo (SiO_2) son los cristales preferidos, siendo los primeros los más preferidos. La Tabla 1 da las propiedades principales de estos dos cristales, para comparación, con las propiedades del cristal de niobato de litio ($LiNbO_3$) que se ha usado en la técnica anterior (las propiedades se dan a temperatura ambiente y una región de longitud de onda de 800 nm).

TABLA 1

Cristal	B	$\partial^2 B / \partial \lambda^2$	χ
MgF_2	0,012	$1,1 \times 10^{-9} / \text{nm}^2$	$-4,7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

SiO ₂	0,009	2,1 x 10 ⁻⁹ / nm ²	-12,7 x 10 ⁻⁵ / °C
LiNbO ₃	-0,079	-66,6 x 10 ⁻⁹ / nm ²	-51,3 x 10 ⁻⁵ / °C
LiB ₃ O ₅ (corte x)	0,014	1,3 x 10 ⁻⁹ / nm ²	-45,5 x 10 ⁻⁵ / °C

Aunque LiNbO₃ tiene una mayor birrefringencia que MgF₂ y SiO₂, la dependencia de temperatura y longitud de onda de su birrefringencia es bastante alta y, por lo tanto, un interferómetro de lectura diseñado con este cristal tendría severos inconvenientes. (El cristal de LiB₃O₅ (corte x) se analiza en una sección posterior).

5 Dada un interferómetro de lectura fabricado de una cuña birrefringente **13** de MgF₂ con un intervalo de diferencia en la longitud de la trayectoria de aproximadamente 40 000 nm que en la práctica es adecuado para la mayor parte de aplicaciones, y usando una serie de fotodetectores de 25 mm de longitud, se obtiene un ángulo de cuña de aproximadamente 7 grados. Tal ángulo produce una división del haz de luz bastante pequeña (menor de 4 micrómetros) debido a una doble refracción en la salida de la cuña birrefringente **13** y, por lo tanto, no reduce significativamente la visibilidad de las franjas del interferograma.

10 Suponiendo que la longitud de coherencia de la fuente de luz es mucho menor que la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección **12** y con la aproximación a la fuente puntual mencionada anteriormente, el patrón de interferencia (denominado interferograma) registrado por la serie de fotodetectores en la salida del interferómetro de lectura que representa la distribución de la intensidad de la luz $I_r(\delta_r)$ frente a la diferencia en la longitud de la trayectoria δ_r , puede expresarse por la siguiente fórmula derivada de la ley de interferencia general para campos ópticos estacionarios (véase L. Mandel y E. Wolf, Optical coherence and quantum optics, Cambridge University Press, 1995, páginas 159-170):

$$I(\delta_r) = K_s K_r I_o \left[1 + \cos(\theta_r) \operatorname{Re}\{\gamma_{11}(\delta_r)\} + \frac{1}{2} \cos(\theta_r - \theta_s) \operatorname{Re}\{\gamma_{12}(\delta_r - \delta_s)\} \right] \quad (6)$$

25 donde γ_{11} es el grado complejo de autocoherencia de las vibraciones de luz en el interferómetro de lectura y γ_{12} es el grado complejo de coherencia mutua de las vibraciones de luz en el interferómetro de lectura y de detección, $\operatorname{Re}\{\}$ denota la parte real de la cantidad compleja γ , I_o es la intensidad total de la fuente de luz eficaz definida posteriormente en este documento. K_s , K_r y θ_s , θ_r son constantes numéricas que dependen de la configuración del interferómetro de detección y de lectura, respectivamente. Con el uso de las siguientes formas generales para γ :

$$\begin{aligned} \gamma_{11}(\delta_r) &\equiv |\gamma_{11}(\delta_r)| \exp\left(i \left[\alpha_{11}(\delta_r) - 2\pi\nu_o \frac{\delta_r}{c} \right]\right), \\ \gamma_{12}(\delta_r - \delta_s) &\equiv |\gamma_{12}(\delta_r - \delta_s)| \exp\left(i \left[\alpha_{12}(\delta_r - \delta_s) - 2\pi\nu_o \left(\frac{\delta_r - \delta_s}{c} \right) \right]\right) \\ \alpha_{11}(\delta_r) &= 2\pi\nu_o \frac{\delta_r}{c} + \arg\{\gamma_{11}\}, \quad \alpha_{12}(\delta_r - \delta_s) = 2\pi\nu_o \left(\frac{\delta_r - \delta_s}{c} \right) + \arg\{\gamma_{12}\} \end{aligned} \quad (7)$$

30 donde ν_o es la frecuencia media de la fuente de luz eficaz, $|\cdot|$ denota el módulo complejo y $\arg\{\}$ el argumento complejo del valor complejo γ , el interferograma puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} I_r(\delta_r) &= K_s K_r I_o \left[1 + \cos(\theta_r) |\gamma_{11}(\delta_r)| \cos\left[2\pi\nu_o \frac{\delta_r}{c} - \alpha_{11}(\delta_r) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos(\theta_r - \theta_s) |\gamma_{12}(\delta_r - \delta_s)| \cos\left[2\pi\nu_o \left(\frac{\delta_r - \delta_s}{c} \right) - \alpha_{12}(\delta_r - \delta_s) \right] \right] \end{aligned} \quad (8)$$

35 La Ecuación (8) muestra que las franjas del interferograma en la salida del interferómetro de lectura **12** son la suma de dos señales de franja de amplitud modulada. Estas dos señales de franja tienen una portadora del coseno de la frecuencia ν_o , una función de fase α y una función envolvente $|\gamma|$. La función envolvente a menudo se denomina función envolvente de visibilidad o función envolvente de coherencia que es una medida de la visibilidad de franja del interferograma.

De acuerdo con el teorema de Wiener-Khintchine tenemos:

$$\gamma_{11}(\delta_r) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) e^{-i2\pi\nu\frac{\delta_r}{c}} d\nu, \quad \gamma_{12}(\delta_r, -\delta_s) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) e^{-i2\pi\nu\left(\frac{\delta_r - \delta_s}{c}\right)} d\nu \quad (9)$$

donde

$$P(\nu) = \frac{I_{ef}(\nu)}{I_o} \quad (10)$$

es la densidad espectral de potencia normalizada de la fuente de luz eficaz y

$$I_o = \int_0^{\infty} I_{ef}(\nu) d\nu \quad (11)$$

es la intensidad total de la fuente de luz eficaz. Esta última se define por la densidad espectral eficaz $I_{ef}(\nu)$ de la fuente de luz que incluye la dependencia de la longitud de onda de la sensibilidad del fotodetector y la dependencia de la longitud de onda de las pérdidas de transmisión y pérdidas de reflexión de los componentes del sensor óptico. La Ecuación (9) muestra que el grado complejo de autocohérence γ_{11} o el grado complejo de coherencia mutua γ_{12} y la densidad espectral de potencia normalizada de la fuente de luz eficaz $P(\nu)$ forman un par de transformada de Fourier. Por lo tanto, la envolvente y la fase de las franjas del interferograma dependen del espectro de la fuente de luz. En la práctica se observa que α y $|\gamma|$ son funciones que varían lentamente de la diferencia en la longitud de la trayectoria en comparación con la portadora del coseno. Suponiendo que $P(\nu)$ es una gaussiana conformada dada por:

$$P(\nu - \nu_o) = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta\nu\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(2\sqrt{\ln 2} \frac{\nu - \nu_o}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (12)$$

donde $\Delta\nu$ es la anchura máxima en el ancho de banda semimáximo, entonces la Ecuación (8) puede evaluarse analíticamente, dando:

$$I_r(\delta_r) = K_r K_s I_o \left[1 + \cos(\theta_r) \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\delta_r}{c}\right)^2\right] \cos\left(2\pi\nu_o \frac{\delta_r}{c}\right) + \frac{1}{2} \cos(\theta_r - \theta_s) \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\delta_r - \delta_s}{c}\right)^2\right] \cos\left(2\pi\nu_o \frac{\delta_r - \delta_s}{c}\right) \right] \quad (13)$$

La Figura 6 muestra un interferograma típico obtenido en la salida del interferómetro de lectura **12** con una fuente de luz eficaz que tiene una densidad espectral de potencia con forma gaussiana. La curva de línea continua **70** representa las franjas medidas mientras que las curvas de línea discontinua **71** representan la envolvente de las franjas que, obviamente no es una señal observable directamente. El interferograma muestra dos paquetes de franjas: en uno primero, denominado en lo sucesivo en este documento el paquete de franjas cero **72**, con pico en una posición **74** donde la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura es igual a cero y un segundo, denominada en lo sucesivo en este documento el paquete de franjas del mesurando **73**, con pico en una posición **75** donde la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura **12** es igual a la del interferómetro de detección **10**, es decir $\delta_r = \delta_s$. Para el siguiente análisis, solo se retendrá el paquete de franjas medido como el único de interés para la aplicación de detección. Puesto que la densidad espectral de potencia normalizada $P(\nu)$ es una función real, las Ecuaciones (7) y (9) con las propiedades de la transformada de Fourier muestran que la función envolvente $|\gamma_{12}|$ es simétrica alrededor de $\delta_r = \delta_s$ y $\alpha_{12}(0)$ es igual a cero. Por lo tanto, las franjas están centrados con su envolvente de manera que la posición del pico de la franja **76** o que el pico de la envolvente **77** del paquete de franjas proporcionan un valor no ambiguo de la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección y, por lo tanto, sobre el valor del mesurando. Sin embargo, se observa que en comparación con la función de la franja, la envolvente es una función que varía lentamente en la diferencia en la longitud de la trayectoria y, por lo tanto, la localización del pico de la franja generalmente es un método de detección más sensible que el método del pico de la envolvente.

La Figura 7 muestra un ejemplo no reivindicado para el interferómetro de lectura **12**. Un mecanismo de exploración **90** mueve la cuña birrefringente **13** en una dirección transversal al haz de luz **93**. A medida que la cuña **13** se desplaza delante del haz **93**, la intensidad de la luz se registra mediante un sensor óptico único **92**. Usando una óptica de enfoque apropiada **91**, el tamaño transversal **94** del haz de luz **93** en la posición de la cuña puede hacerse suficientemente pequeño para que la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura **12** no varíe significativamente respecto al tamaño del haz. Con este interferómetro de lectura de polarización de exploración **12**, el interferograma se forma en el dominio del tiempo en lugar de en el dominio del espacio. Puesto que la exploración mecánica no proporciona una alta resolución temporal, tal interferómetro de exploración generalmente está restringido a aplicaciones de mediciones estáticas o casi estáticas. Sin embargo, tiene distintas ventajas, entre otras, una capacidad de producción óptica mayor y el hecho de que la detección óptica puede diseñarse alrededor de las regiones de longitud de onda de 1300 nm o 1550 nm usadas en telecomunicación por fibra óptica y beneficios a partir de la baja absorción de las fibras ópticas y la baja dispersión de los materiales birrefringentes en estas regiones espectrales. Se sabe que una serie de fotodetectores para la región de longitud de onda 1300 o 1550 nm tiene un precio prohibitivo para hacer rentable a la solución con sensores ópticos para aplicaciones industriales. Por otro lado, los detectores únicos, además de las fuentes de luz y los componentes ópticos desarrollados para la industria de las telecomunicaciones con fibra óptica, están fácilmente disponibles a un coste relativamente bajo. Otra ventaja comparativa con respecto al interferómetro de Michelson de exploración bien conocido, es que este interferómetro de lectura de polarización de exploración **12** no requiere un mecanismo de exploración de alta precisión, como puede verse a partir de la ecuación (3).

Haciendo referencia de nuevo a la Figura 4, la serie de fotodetectores **19** está situada en una dirección paralela al eje x de manera que cada píxel o fotodiodo de la serie corresponde a un valor conocido en la posición x. La diferencia en la longitud de la trayectoria δ_r del interferómetro de lectura está calibrada para un conjunto de valores de posición x en el eje x. El calibrado puede realizarse usando diferentes métodos tales como, aunque sin limitación, una técnica de transmisión espectrofotométrica bien conocida o con un interferómetro de referencia explorable. La señal de la serie de fotodetectores se adquiere a una tasa de lectura ajustable. Cada exploración de la serie proporciona una señal eléctrica representativa de la señal del interferograma del mesurando distribuida espacialmente como se da por el último término de la Ecuación (8). Esta señal eléctrica se muestrea digitalmente por la unidad del procesador de señales **21** que busca la posición x del pico de la franja o del pico de la envolvente de la señal del interferograma. Una vez que esta posición x se resuelve, la unidad de procesamiento de señales **21** calcula, usando los datos de calibrado del interferómetro de lectura, la diferencia en la longitud de la trayectoria correspondiente del interferómetro de lectura **12** y, de esta manera, la del interferómetro de detección **10**. Posteriormente este valor se traslada al valor del mesurando usando los datos de calibrado del interferómetro de detección. Es obvio que pueden aplicarse enfoques similares para el diseño del interferómetro de lectura de polarización de exploración **12** de la Figura 7, por lo tanto los siguientes análisis se restringirán al diseño del interferómetro estático.

Una de las tareas más importantes de la unidad de procesamiento de señales es recuperar con precisión la posición x del pico de la franja o del pico de la envolvente de la señal del interferograma del mesurando recibida desde la serie de fotodetectores **19**. El ruido en el patrón fijo inherente a cualquier interferómetro estático se retira de la señal del interferograma muestreado mediante una corrección de la medida inicial apropiada. El ruido en el patrón fijo principalmente se determina por la limpieza de los componentes ópticos, en particular la cuña birrefringente **13** y por la sensibilidad de no uniformidad de los fotodiodos individuales de la serie de fotodetectores **19**. Después, tal señal corregida en su medida inicial se filtra digitalmente en el dominio del espacio o en el dominio de la frecuencia para reducir las aberraciones residuales y el ruido dinámico en la señal corregida en su medida inicial. Se retira también el componente de frecuencia cero y baja de la señal corregida para medida inicial. La señal restante denominada en lo sucesivo en este documento la señal del interferograma corregida, I_{corr} , representa los componentes oscilatorios del interferograma y, por tanto, tenemos

$$I_{corr}(\delta_r) \propto \text{Re}\{\gamma_{12}(\delta_r - \delta_s)\} = |\gamma_{12}(\delta_r - \delta_s)| \cos\left[2\pi\nu_o \left(\frac{\delta_r - \delta_s}{c}\right) - \alpha_{12}(\delta_r - \delta_s)\right] \quad (14)$$

Esta señal, representativa de la señal del paquete de franjas del mesurando **73** de la Figura 6 que es menor en su componente DC, tiene que procesarse adicionalmente para extraer el valor de la posición x del pico de la franja o el del valor del pico de la envolvente. En primer lugar se realiza una rutina sencilla de búsqueda para encontrar el pico para localizar el pico de la franja. Después se realiza un ajuste por mínimos cuadrados polinómico alrededor del pico de la franja para determinar con precisión la localización del pico de la franja. Este método tiene la ventaja de ser muy sencillo de implementar y no requiere una potencia de cálculo significativa por parte de la unidad de procesamiento de señales.

Aunque en teoría el método de pico de la envolvente ofrece menos resolución que el método de pico de la franja, puede ser ventajoso en algunas condiciones localizar el pico de la envolvente en lugar del pico de la franja. Para este fin, la función envolvente tiene que extraerse de la señal del interferograma corregida y los que están familiarizados con las señales de comunicación pueden reconocer las similitudes entre las características de la señal

de interferograma corregida y aquellas encontradas en las señales de comunicación con amplitud modulada. Por lo tanto, las técnicas de demodulación de amplitud bien conocidas por detección de la envolvente pueden implementarse fácilmente usando métodos de procesamiento de señal digital. Un objetivo de esta invención es proporcionar medios para localizar el pico de la envolvente del paquete de franjas del mesurando. En primer lugar, la función envolvente se extrae de la señal del interferograma corregida usando, por ejemplo, el método de transformada de Hilbert o el método de filtración de paso bajo cuadrático, ya sea en el dominio del espacio o en el dominio de la frecuencia. Después se realiza un ajuste por mínimos cuadrados polinómico alrededor del pico de la envolvente para determinar con precisión la localización del pico de la envolvente. Tales métodos de procesamiento de señal digital requieren que la señal del interferograma se muestree a la tasa Nyquist o superior. Hoy en día, una serie lineal de fotodetectores de alta densidad es de uso común, por lo que este requisito se satisface fácilmente en la práctica.

Cuando el interferómetro de detección (y/o de lectura) contiene medios de dispersión, la diferencia en la longitud de la trayectoria ya no es constante con respecto a la frecuencia. Una dispersión de alto orden puede producir un ensanchamiento significativo y asimétrico de la envolvente del interferograma, una disminución de la visibilidad de la franja y un desplazamiento de fase adicional entre la envolvente y las franjas. Si no se corrige apropiadamente, estos efectos perjudiciales pueden reducir severamente la precisión de los métodos de detección del pico de la franja o del pico de la envolvente. Se ha sugerido en la técnica anterior usar un interferómetro de lectura **12** fabricado del mismo material que el interferómetro de detección **10**. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, esta configuración no es deseable. Una configuración mucho mejor es usar un material birrefringente que tenga términos de dispersión similares (es decir, términos de dispersión lineales y de orden superior) que los del interferómetro de detección **10**, pero sin su sensibilidad al mesurando. En el caso de los interferómetros de detección y lectura de polarización, hay pares de cristales birrefringentes que tienen una dispersión similar pero uno de los cristales tiene una baja sensibilidad al mesurando. Por lo tanto, un objetivo de esta invención es proporcionar un método de compensación de dispersión basado en las propiedades de dispersión del interferómetro de lectura y detección. Por ejemplo, el cristal de MgF_2 del interferómetro de lectura puede emparejarse con el cristal de triborato de litio (LiB_3O_5). Este cristal biaxial puede usarse como un interferómetro de detección de temperatura de polarización. Su coeficiente de temperatura se compara muy bien con otros cristales usados para este fin en la técnica anterior (véase la Tabla 1). Con el convenio $n_z > n_y > n_x$ para los índices principales del cristal birrefringente, la birrefringencia del cristal de LiB_3O_5 para la orientación con corte x (es decir, los ejes de vibración principales y y z son paralelos a la superficie de la placa del cristal) es por tanto $B \equiv (n_z - n_y)$. Con tal orientación, los términos de dispersión de birrefringencia de este cristal son similares a los del cristal de MgF_2 . Esto se aprecia mejor mediante la representación de la curva de la diferencia de los términos de dispersión de birrefringencia entre estos dos cristales. La Figura 8 muestra la curva de dispersión de birrefringencia diferencial normalizada ΔB en el intervalo de la frecuencia de interés para MgF_2 (B_r) y LiB_3O_5 con corte x (B_s) para el par de cristales. Δb se define de la siguiente manera:

$$\Delta B(\nu) = 2 \frac{(B_r(\nu) - B_r(\nu_o)) - (B_s(\nu) - B_s(\nu_o))}{B_r(\nu_o) + B_s(\nu_o)} \quad (15)$$

donde $B(\nu)$ representa la función de birrefringencia dependiente de la frecuencia del interferómetro de lectura (subíndice r) y de detección (subíndice s). Puede verse que ΔB varía en menos del 0,5 % en el intervalo de frecuencia de interés. Una variación pequeña de este tipo no produce ningún cambio significativo en la señal del interferograma.

La Figura 9 muestra la curva de la señal del interferograma medida (curva (a)) obtenida con un interferómetro de lectura de polarización fabricado de una cuña de cristal de MgF_2 y con un interferómetro de detección de polarización fabricado de una placa de cristal con corte x de LiB_3O_5 . La curva (b) es la curva de la señal del interferograma del mesurando obtenida con el mismo interferómetro de lectura pero con el cristal de $LiNbO_3$ usado en la técnica anterior. En la Figura 9 no se muestra el hecho de que el pico de la franja del cristal con corte x de LiB_3O_5 permanece casi en la misma posición que el pico de la envolvente mientras varía la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección. Por otro lado, con el cristal de $LiNbO_3$, las franjas parecen moverse dentro de la envolvente mientras varía la diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de detección. Puede verse también que la envolvente en este caso es más ancha y que el contraste es menor. Es evidente que el cristal con corte x de LiB_3O_5 es una mejor opción. Otro objetivo de esta invención es proporcionar un interferómetro de detección de temperatura de polarización basado en cristal de LiB_3O_5 con corte x. Pueden realizarse diversas configuraciones de reflexión y transmisión de este interferómetro como se describe en el documento de Mariller y Lequime y no se dan aquí puesto que son evidentes para los expertos en la materia.

REIVINDICACIONES

1. Un interferómetro de polarización (12), que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria, para proporcionar, tras recibir una luz de entrada (24), una señal de salida, comprendiendo el interferómetro de polarización:
- 5 un polarizador de entrada (15) para descomponer dicha luz de entrada (24) en un primer y un segundo componentes ortogonales de polarización lineal dispuestos a lo largo de una primera (x) y una segunda (y) direcciones respectivamente;
- 10 una única cuña birrefringente (13) en la cual dichos componentes de polarización se propagan a diferentes velocidades, estando orientada la cuña (13) a lo largo de la primera dirección (x);
- un polarizador de salida (16) para recombinar, después de la propagación en la cuña (13), los componentes de polarización; y
- 15 una disposición óptica anamórfica (20) para confinar la luz de entrada (24) en la segunda dirección (y) y para retransmitir la luz de entrada (24) a través de la única cuña birrefringente (13) y el polarizador de salida (16) y hacia una localización de salida,
- en donde la luz de entrada (24) se considera procedente de una fuente puntual (27) al menos en la primera dirección (x);
- en donde no hay una disposición óptica de enfoque para enfocar la luz de entrada (24) en la primera dirección (x) entre la fuente puntual (27) y la localización de salida;
- 20 con lo que dicho interferómetro (12), tras recibir dicha luz de entrada (24), proporciona, en la localización de salida, dicha señal de salida como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria.
2. El interferómetro de polarización de la reivindicación 1, en el que dicha cuña birrefringente única comprende un cristal de MgF_2 .
- 25 3. El interferómetro de polarización de la reivindicación 2, en el que dicha diferencia en la longitud de la trayectoria comprende una diferencia en la longitud de la trayectoria que varía espacialmente como una función de un eje de lectura a lo largo de la primera dirección (x) y en el que dicha señal de salida comprende una señal distribuida espacialmente a lo largo de dicho eje de lectura y adicionalmente en el que la localización de salida está distribuida espacialmente a lo largo de dicho eje de lectura, para proporcionar de esta manera un interferograma distribuido en la localización de salida.
- 30 4. Un sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem, basado en interferometría de baja coherencia, para medir una cantidad física, comprendiendo el sistema:
- 35 un sistema de iluminación (11) que genera una intensidad de la luz (22) **caracterizado por** una longitud de coherencia;
- un interferómetro de detección (10), que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor mayor que dicha longitud de coherencia, para recibir la intensidad de la luz (22) y generar una señal luminosa del sensor como una función de dicha diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor, en donde dicha diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor puede modificarse mediante una variación de la cantidad física; y un
- 40 interferómetro de lectura de polarización (12) de acuerdo con la reivindicación 1, teniendo dicho interferómetro de lectura de polarización una diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura y estando basado en una configuración del interferómetro de dos haces, recibir la señal luminosa del sensor y generar, en una localización de salida y como función de dicha diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura, una señal luminosa de lectura.
- 45 5. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 4, en el que dicha diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor comprende una trayectoria en un primer material birrefringente y dicha cuña birrefringente está hecha de un segundo material birrefringente diferente de dicho primer material birrefringente, y en el que dichos primero y segundo materiales birrefringentes tienen propiedades de dispersión similares, para proporcionar de esta manera un sistema de sensor óptico de dispersión compensada.
- 50 6. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 4, en el que dicha diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura del interferómetro de lectura de polarización comprende una diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura que varía espacialmente como una función del eje de lectura a lo largo de la primera dirección (x).
- 55 7. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 6, en el que dicha señal luminosa de lectura comprende una señal distribuida espacialmente a lo largo de dicho eje de lectura y en el que la localización de detección está distribuida espacialmente a lo largo de dicho eje de lectura, para proporcionar de esta manera un interferograma distribuido en la localización de detección.
- 60 8. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 7, en el que dicha disposición óptica anamórfica comprende uno de una lente cilíndrica y un espejo cilíndrico para confinar a lo largo de dicho eje de lectura dicho interferograma distribuido.
- 65

9. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 7, que comprende además una fibra óptica para retransmitir la señal luminosa del sensor desde el interferómetro de detección hasta el interferómetro de lectura de polarización.
- 5 10. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 9, que comprende además una fibra óptica para retransmitir la intensidad de la luz desde el sistema de iluminación hasta el interferómetro de detección.
- 10 11. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 7, que comprende además una serie de fotodetectores situados en la localización de detección, para recibir dicho interferograma distribuido y generar una señal de fotodetector correspondiente como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura.
- 15 12. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 11, que comprende además una unidad de procesamiento de señales para determinar la cantidad física a partir de la señal de fotodetector variable, proporcionando de esta manera un sistema de sensor óptico para la medición de dicha cantidad física.
- 20 13. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 12, en el que dicha unidad de procesamiento de señales comprende un software embebido para determinar un máximo de la variación de la señal del fotodetector, para obtener así dicha cantidad física a partir de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura correspondiente a este máximo.
- 25 14. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de la reivindicación 13, en el que dicho software embebido comprende una base de datos de calibrado en la que se almacena una relación entre una serie de valores de dicha cantidad física y su diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor correspondiente.
- 30 15. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de las reivindicaciones 7 o 14, en el que dicha diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor comprende una trayectoria en un primer material birrefringente y dicha cuña birrefringente está hecha de un segundo material birrefringente y en el que dichos primer y segundo materiales birrefringentes tienen propiedades de dispersión similares.
- 35 16. El sistema de sensor óptico de interferómetros en tándem de las reivindicaciones 5 o 15, en el que dicho primer material birrefringente comprende LiB_3O_5 con orientación de corte x y el segundo material birrefringente comprende MgF_2 .
- 40 17. Un método, basado en interferometría de baja coherencia, para medir una cantidad física, comprendiendo el método:
- 45 proporcionar un sistema de iluminación (11) para generar una intensidad de la luz (22) **caracterizada por** una longitud de coherencia;
- proporcionar un interferómetro de detección (10) para recibir la intensidad de la luz (22) y generar una señal luminosa del sensor, que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor que es sensible a la cantidad física de tal manera que puede modificarse mediante una variación de la cantidad física y que es mayor que dicha longitud de coherencia;
- 50 proporcionar un interferómetro de lectura de polarización (12) que tiene una diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura y que está basado en una configuración de interferómetro de dos haces, comprendiendo dicho interferómetro de lectura de polarización (12) un polarizador de entrada (15) para descomponer la señal luminosa del sensor en un primer y un segundo componentes de polarización ortogonales lineales dispuestos a lo largo de una primera (x) y una segunda (y) dirección, respectivamente, una única cuña birrefringente (13) en la que dichos componentes de polarización se propagan a diferente velocidad, estando orientada la cuña (13) a lo largo de la primera dirección (x), un polarizador de salida (16) para recombinar después de la propagación en la cuña (13) los componentes de polarización y una disposición óptica anamórfica (20) para confinar la señal luminosa del sensor en la segunda dirección (y) y para retransmitir la señal luminosa del sensor a través de la
- 55 única cuña birrefringente (13) y el polarizador de salida (16) y hacia una localización de salida, en donde la señal luminosa del sensor se considera procedente de una fuente puntual (27), al menos en la primera dirección (x), en donde no hay una disposición óptica de enfoque para enfocar la señal luminosa del sensor en la primera dirección (x) entre la fuente puntual (27) y la localización de salida;
- proporcionar, en una localización de detección, un fotodetector (19);
- 60 retransmitir la intensidad de la luz desde el sistema de iluminación (11) al interferómetro de detección (10), en donde dicho interferómetro de detección (10) genera la señal luminosa del sensor como una función de su diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor; retransmitir dicha señal luminosa del sensor, usando dicha disposición óptica anamórfica (20) a través del polarizador de entrada (15), la cuña birrefringente (13) y el polarizador de salida (16) y hacia dicha localización de salida y generando, en dicha localización de detección por recombinación de dichos componentes de polarización, una señal luminosa de lectura como una función de
- 65 dicha diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura;

detectar, con dicho fotodetector (19), dicha señal luminosa de lectura; y
generar una señal de fotodetector correspondiente a la señal luminosa de lectura detectada, como una función
de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura para determinar la cantidad física analizando la señal
del fotodetector como una función de la diferencia en la longitud de la trayectoria de lectura.

5 18. El método de acuerdo con la reivindicación 17, que comprende además proporcionar una base de datos de
calibrado que relaciona dicha diferencia en la longitud de la trayectoria del sensor con dicha cantidad física.

10 19. El método de acuerdo con la reivindicación 17, en el que dicha etapa de proporcionar un interferómetro de
detección comprende proporcionar en dicha diferencia de longitud en la trayectoria del sensor una trayectoria en un
primer material birrefringente y en donde dicha etapa de proporcionar un interferómetro de lectura de polarización
comprende proporcionar una cuña birrefringente hecha de un segundo material birrefringente y comprende además
seleccionar dichos primer y segundo materiales birrefringentes de manera que tengan propiedades de dispersión
15 similares, siendo diferentes dichos primer y segundo materiales birrefringentes, para proporcionar de esta manera un
sistema de sensor óptico de dispersión compensada.

20 20. El método de acuerdo con la reivindicación 18, en el que dicha retransmisión de dicha señal luminosa del sensor
comprende distribuir dicha señal luminosa del sensor a lo largo de la cuña birrefringente tal como para producir,
como una señal luminosa de salida, un interferograma distribuido espacialmente.

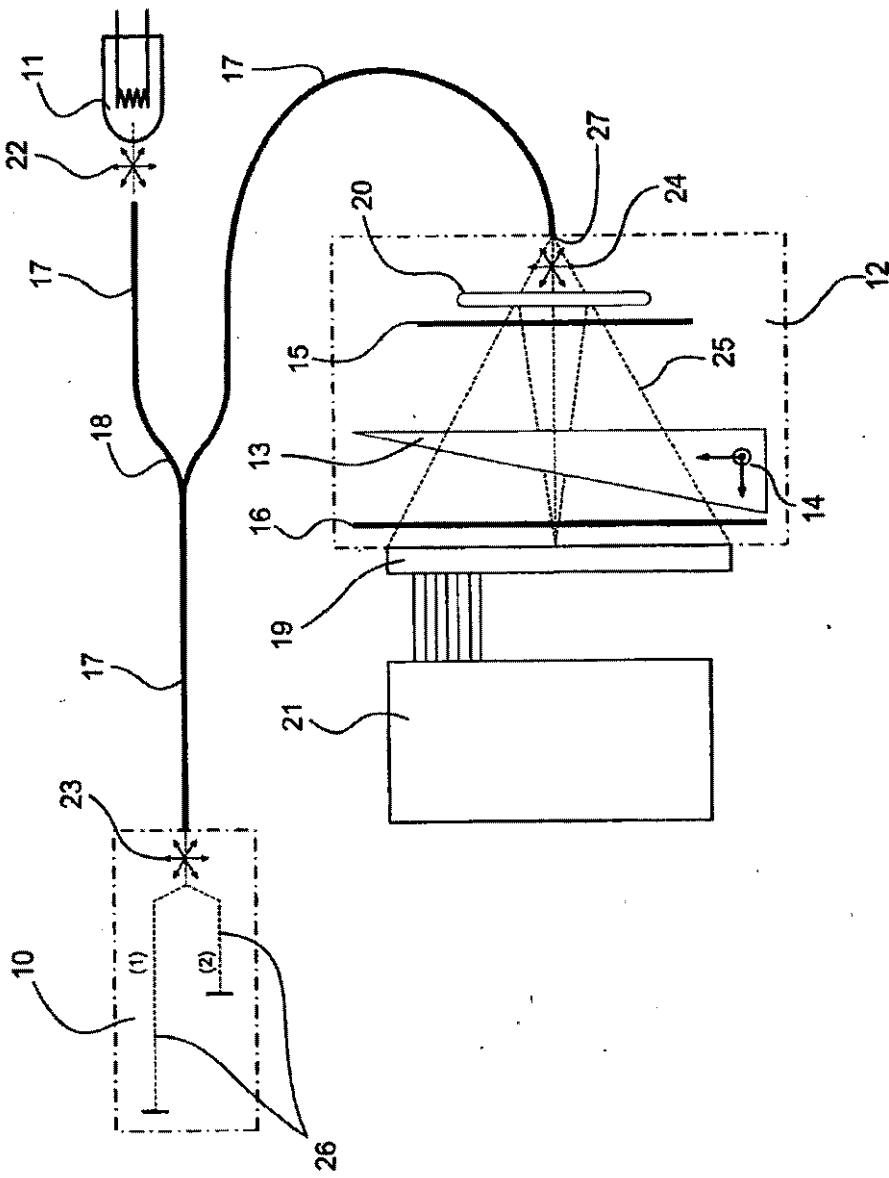


FIG. 1

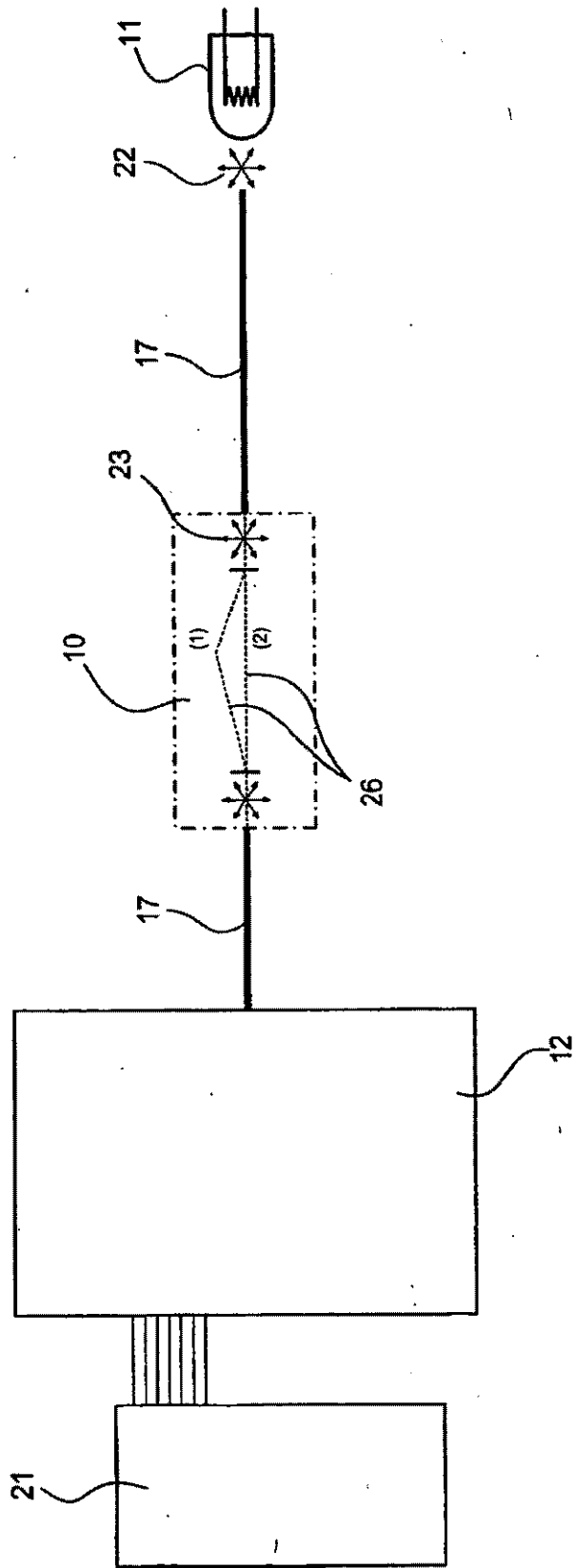
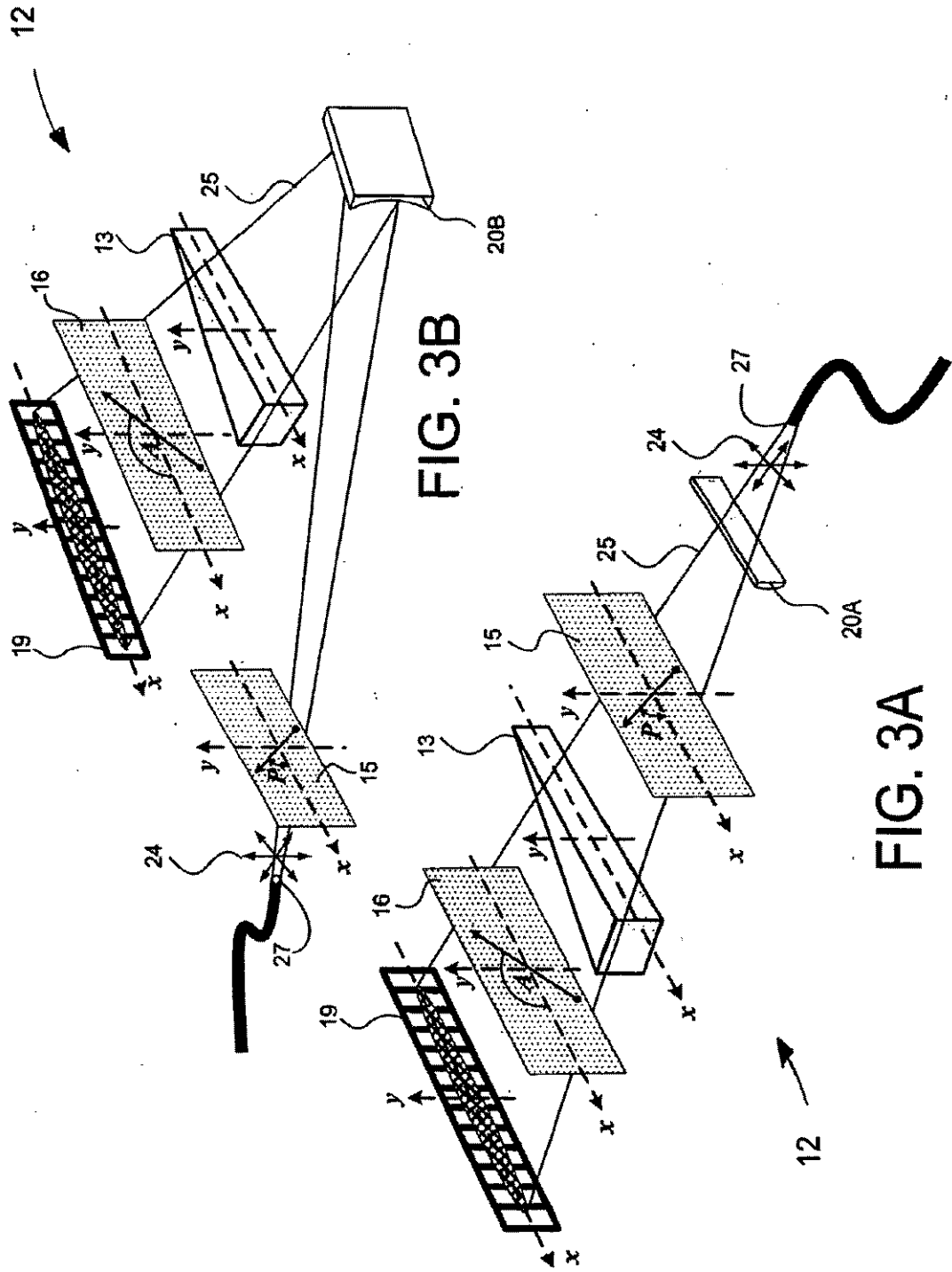


FIG. 2



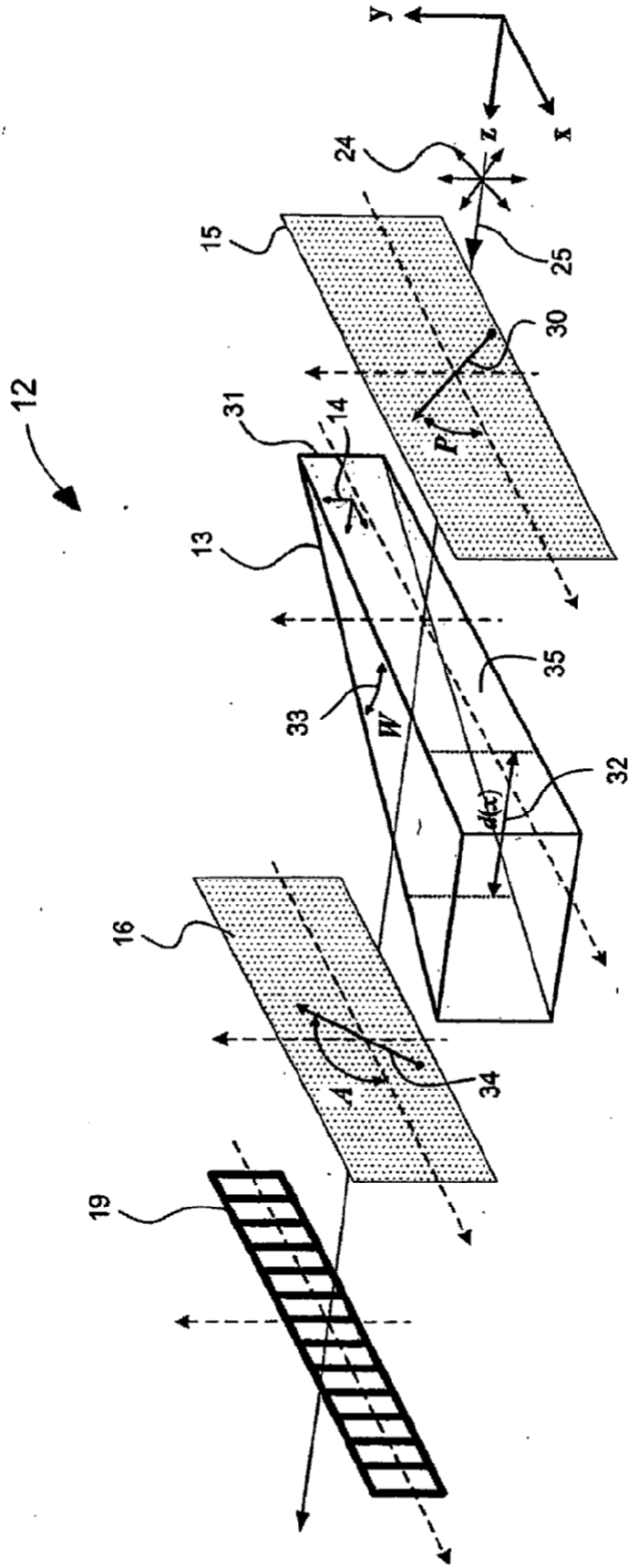


FIG. 4

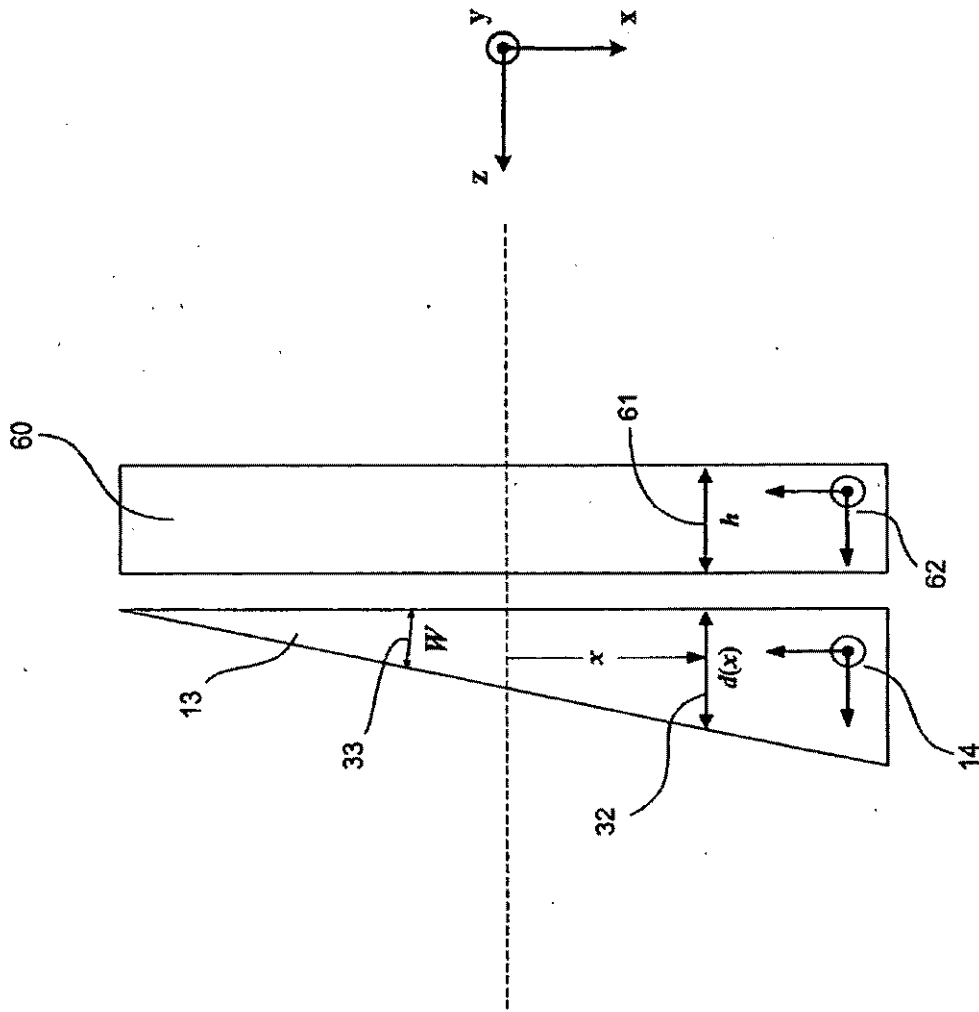
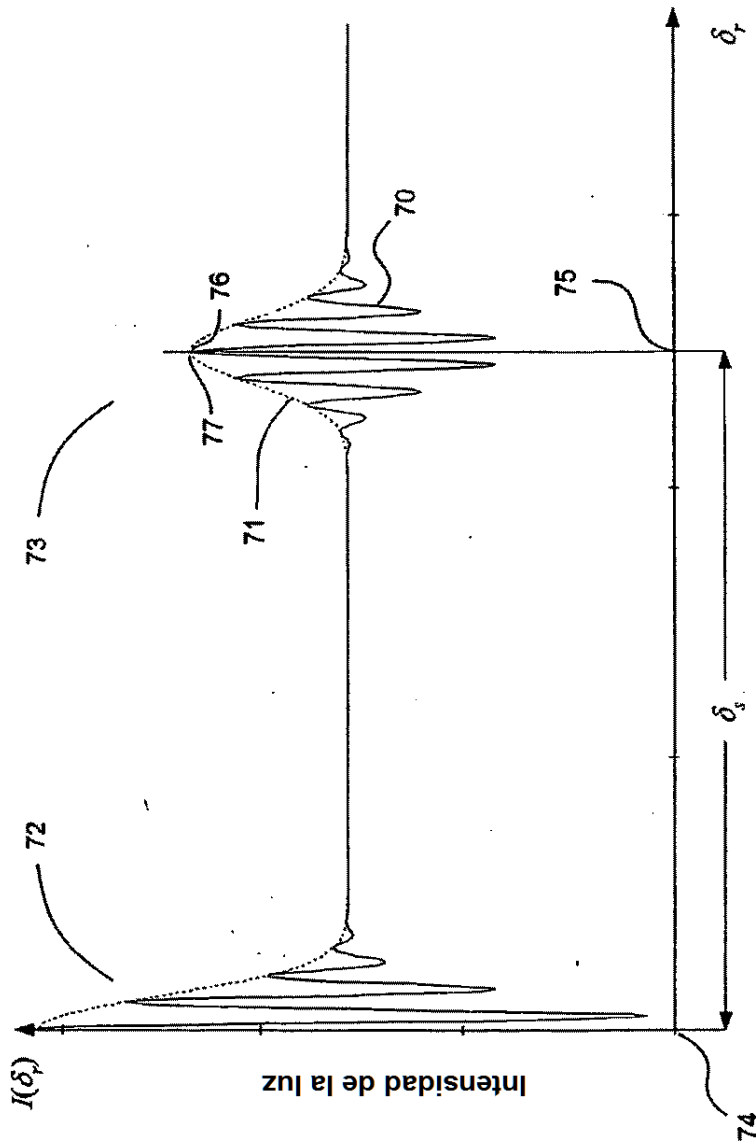


FIG. 5



Diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura

FIG. 6

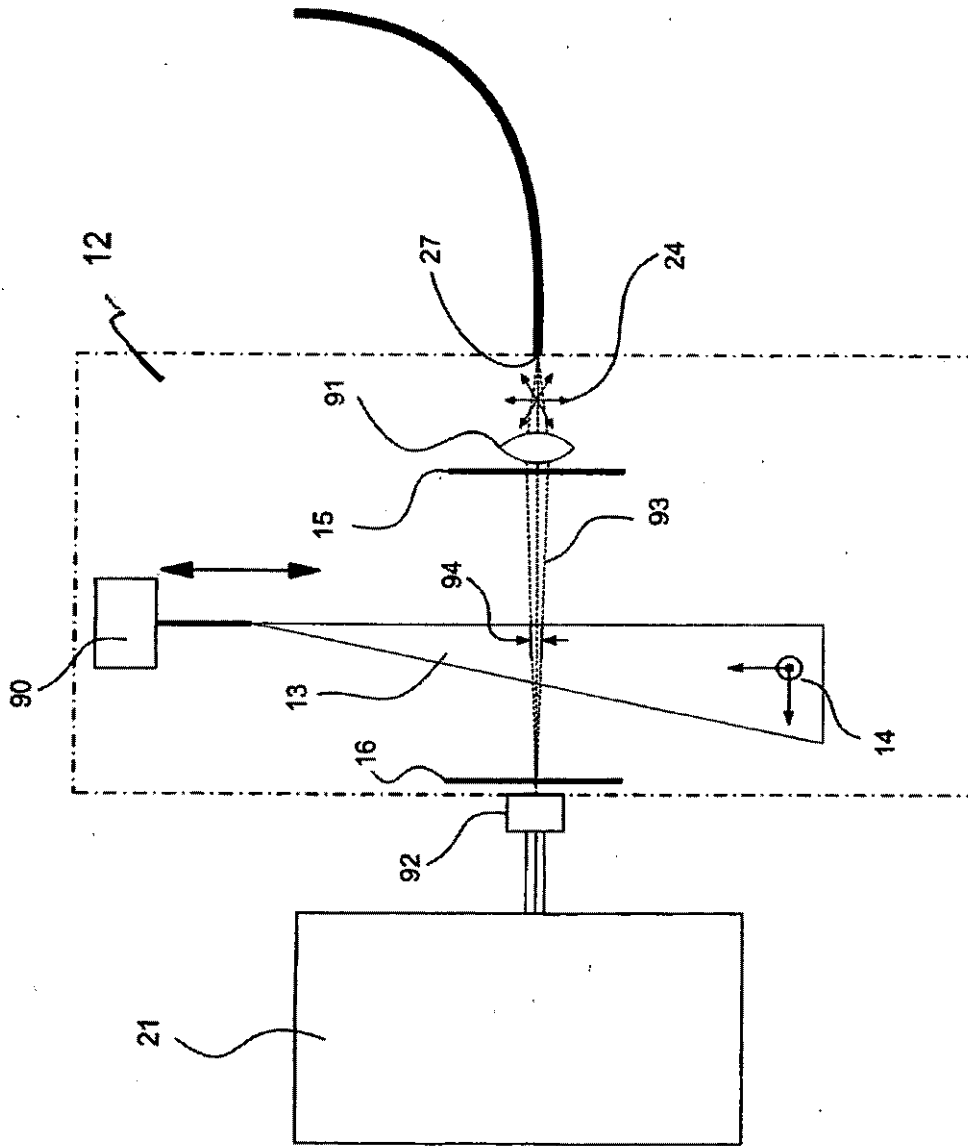


FIG. 7

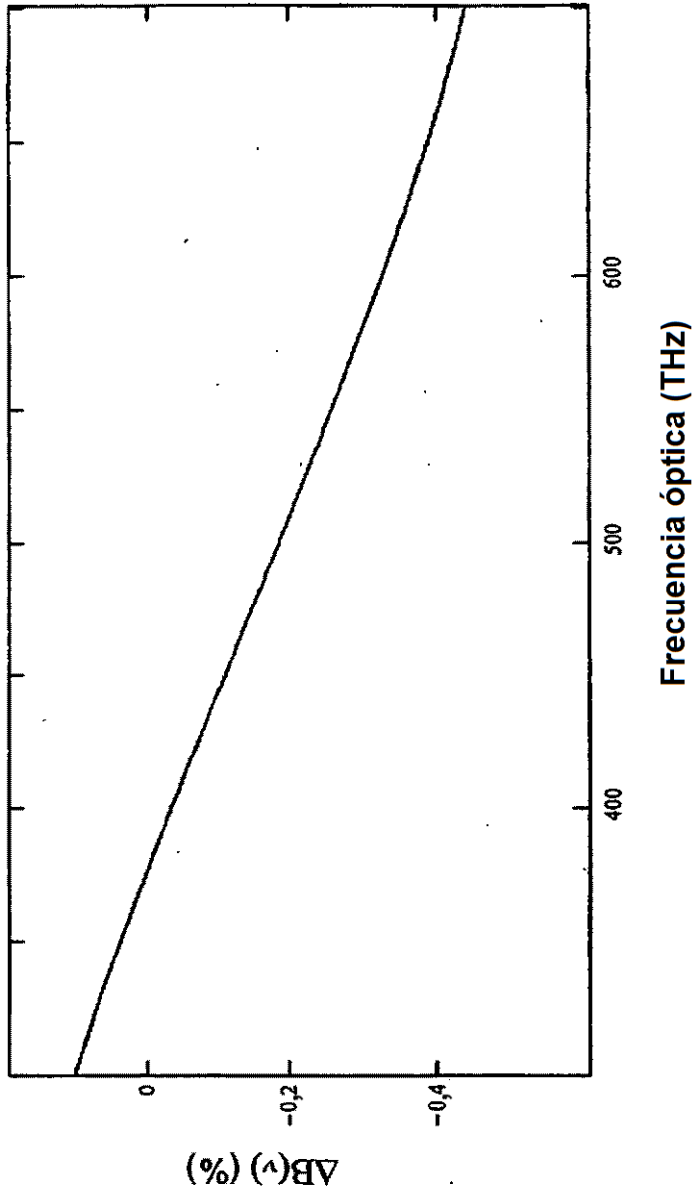
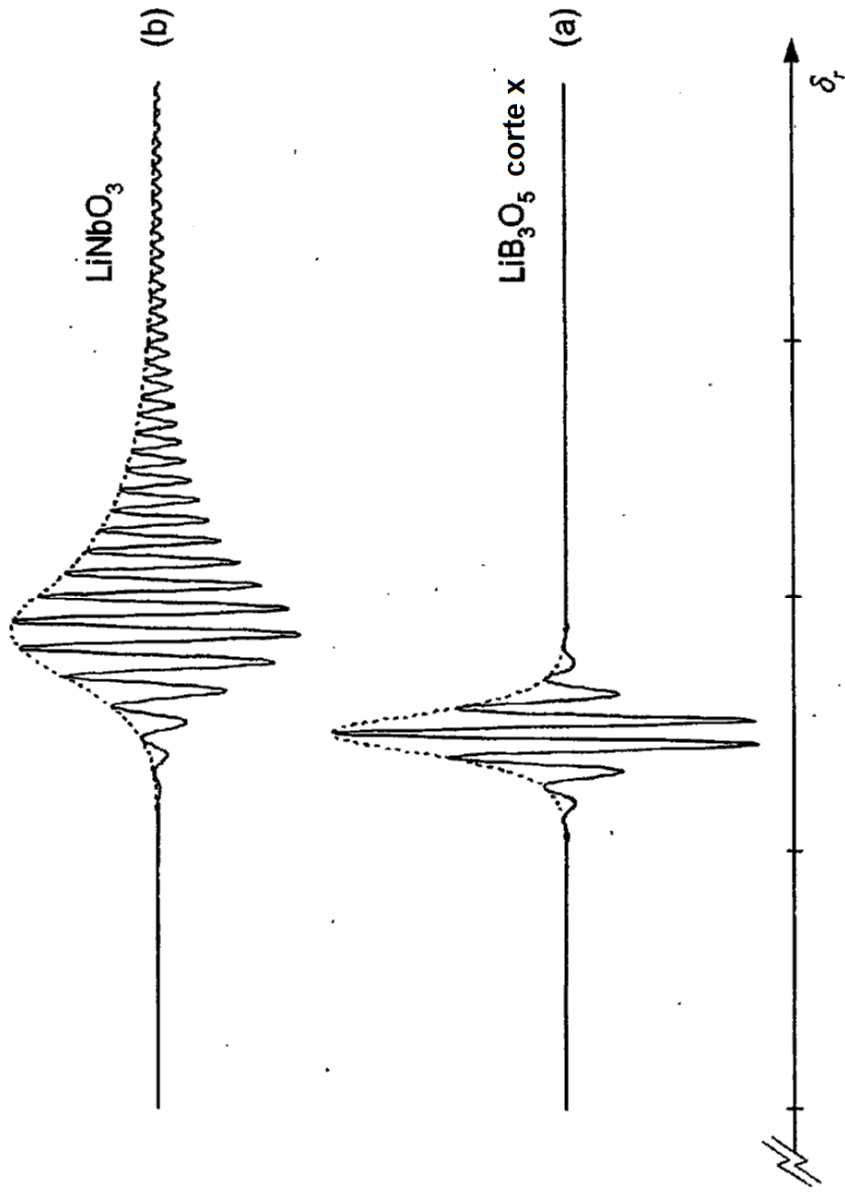


FIG. 8



Diferencia en la longitud de la trayectoria del interferómetro de lectura

FIG. 9