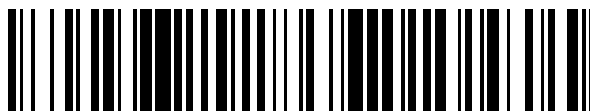


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 409 709**

51 Int. Cl.:

G01S 17/58 (2006.01)

G01S 17/95 (2006.01)

G01N 21/47 (2006.01)

G01N 15/00 (2006.01)

G01B 9/02 (2006.01)

G01S 7/481 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2011 E 11172464 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2013 EP 2405287**

54 Título: **Dispositivo de teledetección láser y procedimiento de interferometría**

30 Prioridad:

08.07.2010 FR 1055579

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

27.06.2013

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES
(100.0%)
2, Place Maurice Quentin
75001 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**BRUNEAU, DIDIER;
MONTMESSIN, FRANCK;
FAURE, BENOÎT y
PELON, JACQUES**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 409 709 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

Dispositivo de teledetección láser y procedimiento de interferometría.

5 Campo técnico general

La invención se refiere a un dispositivo y a un procedimiento de teledetección láser.

10 De forma más precisa, la invención se refiere a un dispositivo de teledetección conocido por el experto en la materia con el acrónimo anglosajón LIDAR (*Light Detection and Ranging*), y a un procedimiento de interferometría que utiliza dicho dispositivo.

Estado de la técnica

15 Los dispositivos de teledetección láser de tipo LIDAR son unos dispositivos de medición a distancia que tienen numerosas aplicaciones, en particular en física de la atmósfera, geología o cartografía.

En particular, permiten medir a distancia características físicas de un volumen de materia, por ejemplo en la atmósfera terrestre, pudiendo estas características ser en particular la velocidad o la composición de dicho volumen.

20 Dichos dispositivos se basan en la emisión de un haz luminoso láser hacia un volumen de materia, la medición y el análisis de los haces luminosos reenviados por dicho volumen, en dirección al dispositivo emisor, como respuesta a la interacción con dicho haz luminoso láser.

25 Se ha representado esquemáticamente, en la figura 1 un dispositivo de teledetección láser 7 de tipo LIDAR según la técnica anterior.

El dispositivo comprende una fuente láser 1, apta para emitir un haz luminoso 3 hacia un volumen 2 de materia.

30 La interacción entre el haz luminoso 3 emitido y el volumen 2 de materia provoca la difusión de haces luminosos 8. Los haces luminosos difundidos 8 por el volumen 2 de materia son colectados por un dispositivo óptico colector 4, que es generalmente un telescopio, y dirigidos hacia un dispositivo de filtrado espectral 5.

35 El dispositivo de filtrado espectral 5 es un dispositivo que transmite los haces luminosos colectados de manera variable en función de la frecuencia de dichos haces, según una función de transferencia. La función de transferencia caracteriza la transmisión de los haces luminosos en función de su frecuencia.

Por ejemplo, se puede tratar de un interferómetro apto para transmitir los haces luminosos colectados en función de la frecuencia de dichos haces y de una diferencia de camino óptico (δ) introducida en dicho interferómetro.

40 Unos ejemplos de una o varias funciones de transferencia están representados en las figuras 2A (caso de un dispositivo de filtrado espectral en base a un filtro espectral) y 2B (caso de un dispositivo de filtrado espectral en base a dos filtros espectrales utilizados de forma simultánea).

45 Existe así una correspondencia entre la transmisión del haz luminoso que penetra en el dispositivo de filtrado espectral y la frecuencia de dicho haz luminoso.

La intensidad de los haces luminosos así transmitidos por el dispositivo de filtrado espectral 5 se mide mediante uno o varios detectores ópticos 6 a la salida de dicho dispositivo de filtrado espectral 5.

50 Comparando la intensidad de los haces luminosos difundidos, colectados y después transmitidos por el dispositivo de filtrado espectral con la intensidad de los haces luminosos de referencia emitidos por la fuente láser y directamente transmitidos por el dispositivo de filtrado espectral, se puede acceder a una medición de desplazamiento en frecuencia por efecto Doppler y deducir de ella, por ejemplo, la velocidad del volumen de materia estudiado.

En los dispositivos de la técnica anterior, la fuente láser es de emisión espectral monomodo, es decir que la fuente láser emite un haz luminoso alrededor de una sola frecuencia de emisión. En efecto, si la fuente láser emite unos modos frecuenciales a otras frecuencias, cada uno de estos modos será transmitido de forma diferente por el dispositivo de filtrado espectral, lo cual produce al final una medición interferida a nivel del detector óptico, y por consiguiente, no explotable.

Además, es necesario condicionar la única frecuencia de emisión de la fuente láser a la función de transferencia del dispositivo de filtrado espectral, con el fin de que la frecuencia de emisión del haz luminoso emitido por la fuente láser esté bien posicionada con respecto a dicha función de transferencia.

En general, se inyecta un láser piloto de emisión espectral monomodo en una cavidad láser constituida por un medio amplificador sólido y por espejos en sus extremos.

5 Ese láser piloto impone a la cavidad láser una frecuencia de emisión elegida para adaptarse a la función de transferencia del dispositivo de filtrado espectral.

Para evitar la emisión de modos frecuenciales parásitos, es necesario condicionar la longitud óptica de la cavidad láser a esta frecuencia de emisión.

10 Muy a menudo, uno de los espejos de la cavidad del láser está montado sobre un motor piezoeléctrico, que permite el desplazamiento longitudinal de dicho espejo. Un dispositivo de servomecanismo permite adaptar permanentemente la longitud de la cavidad láser a la frecuencia de emisión del láser monomodo.

15 Dicho servomecanismo es complejo y delicado de utilizar, en particular en unas condiciones medioambientales difíciles.

Este tipo de dispositivo es sensible por ello a las perturbaciones mecánicas y/o térmicas.

20 En particular, una mala inyección del láser piloto o un mal condicionamiento deterioran la calidad de la emisión láser permitiendo la emisión de modos parásitos, lo cual implica un error en la medición. En el caso de un dispositivo de filtrado espectral de tipo interferómetro, el contraste de la señal medida a la salida del interferómetro tenderá a anularse.

25 Por último, dicho dispositivo es costoso y poco robusto.

A partir del estado de la técnica, se conoce el documento "Fibre-optic interferometric systems using low-coherence light sources" de Ning Y. *et al.* (Captadores and Actuators, vol. 30, 1 febrero 1992, pp. 181-192) que describe un interferómetro que comprende una fuente láser de emisión espectral multimodo.

30 Además, se conoce a partir del documento WO 2004/092767 y a partir del documento US 2007/046945 un dispositivo de teledetección láser que utiliza una fuente láser monomodo.

35 Por otra parte, se conoce a partir del documento EP 2 042 876 un interferómetro que permite medir un parámetro dependiente de la velocidad a partir del desplazamiento Doppler entre dos ondas.

Exposición de la invención

La invención propone evitar esos inconvenientes.

40 Con este fin, la invención propone un dispositivo de teledetección láser, que comprende una fuente láser, apta para emitir un haz luminoso hacia un volumen de materia, un dispositivo óptico colector para coleccionar haces luminosos difundidos por dicho volumen como respuesta al haz luminoso emitido por la fuente láser, un interferómetro, apto para introducir una diferencia de camino óptico para crear interferencias a partir de los haces luminosos colectados, y por lo menos un detector óptico para medir la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas
45 interferencias a la salida del interferómetro, estando dicho dispositivo de teledetección láser caracterizado porque la fuente láser es de emisión espectral multimodo, de modo que el espectro de dicho haz luminoso emitido por dicha fuente láser presenta varios modos frecuenciales separados por un intervalo espectral libre, y, el producto de dicho intervalo espectral libre por la diferencia de camino óptico del interferómetro es igual a la celeridad de la luz en el vacío.

50 La invención se completa ventajosamente con las siguientes características, consideradas solas o según cualquiera de sus combinaciones técnicamente posible:

- 55 - la fuente láser es un láser pulsado de estado sólido;
- el interferómetro comprende por lo menos una placa separadora para separar cada haz luminoso colectado hacia por lo menos dos caminos del interferómetro, comprendiendo cada camino unos elementos ópticos reflectores y/o semireflectores para introducir la diferencia de camino entre los haces luminosos separados por la placa separadora;
- 60 - el interferómetro comprende una placa de fase posicionada sobre por lo menos uno de los caminos del interferómetro, una placa separadora de salida para combinar y luego separar los haces luminosos procedentes de cada camino del interferómetro, por lo menos un cubo separador de polarización para separar las polarizaciones de los haces luminosos procedentes de la placa separadora de salida;
- 65 - el interferómetro es apto para crear unas franjas de interferencia a partir de los haces luminosos colectados, y

el detector óptico es un captador de imágenes;

- el interferómetro es de tipo Fabry-Perot o Fizeau y comprende dos superficies planas separadas y parcialmente reflectantes.

La invención propone asimismo un procedimiento de interferometría que utiliza dicho dispositivo de teledetección láser.

La invención presenta numerosas ventajas.

Una ventaja de la invención es que utiliza una fuente láser que es fácil de utilizar.

Otra ventaja de la invención es que es poco sensible a las perturbaciones mecánicas y/o térmicas.

Otra ventaja más de la invención es que permite utilizar una fuente láser cuya emisión espectral es multimodo.

Por último, otra ventaja de la invención es que es menos costosa que algunos dispositivos de la técnica anterior.

Presentación de las figuras

Otras características, objetivos y ventajas de la invención se pondrán más claramente de manifiesto a partir de la descripción siguiente, que es simplemente ilustrativa y no limitativa y que se debe leer haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1, ya comentada, es una representación esquemática de un dispositivo de teledetección láser según la técnica anterior;
- la figura 2, ya comentada, es una representación de una función de transferencia (figura 2A) o de varias funciones de transferencia (figura 2B) de un dispositivo de filtrado espectral;
- la figura 3 es una representación esquemática de un dispositivo de teledetección según la invención;
- la figura 4 es una representación del espectro frecuencial de un haz luminoso emitido por una fuente láser de emisión espectral multimodo, en un dispositivo de teledetección según la invención;
- la figura 5 es una representación esquemática de un interferómetro que puede ser utilizado en un dispositivo de teledetección láser según la invención;
- la figura 6 es una representación esquemática de un interferómetro que puede ser utilizado en un dispositivo de teledetección láser según la invención; y
- la figura 7 es una representación de funciones de transferencia entre una entrada y unas salidas de un interferómetro que puede ser utilizado en un dispositivo de teledetección láser según la invención.

Descripción detallada

En la figura 3 se ha representado un dispositivo 10 de teledetección láser según la invención. Ese dispositivo es de tipo LIDAR, que corresponde al acrónimo anglosajón "*Light Detection and Ranging*", conocido por el experto en la materia.

El dispositivo comprende una fuente láser 13, apta para emitir un haz luminoso 11 hacia un volumen 12 de materia.

El volumen 12 de materia es por ejemplo un volumen de la atmósfera terrestre o de otro planeta, y puede, en particular, comprender unas moléculas 18 y/o unas partículas 19.

El dispositivo 10 de teledetección define un eje de mira 30.

La fuente láser 13 es de emisión espectral multimodo, lo cual significa que el espectro del haz luminoso 11 emitido por dicha fuente láser 13 presenta varios modos frecuenciales separados por un intervalo espectral libre (Δf_{ISL}), como se representa en la figura 4. Por espectro se entiende el espectro frecuencial, es decir el reparto de la energía (E) de cada modo en función de la frecuencia (f) o de la longitud de onda (λ).

El reparto espectral del haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13 está compuesto por un conjunto de modos que tienen una anchura espectral estrecha e idéntica entre dichos modos, estando cada uno de los modos centrado alrededor de una frecuencia $f_0 + n \cdot \Delta f_{\text{ISL}}$, siendo n un entero y f_0 la frecuencia central de emisión del láser. La anchura espectral del haz luminoso es de tamaño finito. La energía total del haz luminoso 11 está repartida de manera media

entre los diferentes modos espectrales.

Ventajosamente, la fuente láser 13 es de emisión espectral multimodo.

5 La fuente láser 13 es, ventajosamente, un láser pulsado de estado sólido, como por ejemplo un láser que utiliza un cristal de Nd:KGW bombeado por diodos. Por ejemplo, este tipo de láser suministra unos impulsos de energía aproximadamente igual a 30 mJ y con una duración aproximadamente igual a 8 ns.

10 En el ejemplo de realización de la figura 4, el intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) es de 1 GHz y el espectro total del haz luminoso se extiende en 70 GHz. Cada modo frecuencial presenta una anchura espectral de 200 MHz.

15 La interacción entre el haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13 y el volumen 12 de materia provoca la difusión de haces luminosos 22 por dicho volumen 12 de materia. Solamente una parte del haz luminoso es redifundida hacia la fuente láser y en la zona situada enfrente de dicho volumen 12. Ese fenómeno se denomina retrodifusión por el experto en la materia.

Los haces luminosos difundidos 22 por el volumen 12 de materia son colectados por un dispositivo óptico colector 14.

20 El dispositivo óptico colector 14 es ventajosamente un telescopio. Un valor típico para la pupila de dicho telescopio es de 10 cm.

25 Los haces luminosos colectados 17 por el dispositivo óptico colector 14 están dirigidos hacia un interferómetro 15. En un modo de realización posible, se dispone ventajosamente una fibra óptica a nivel del foco del telescopio, estando dicha fibra óptica orientada hacia una entrada del interferómetro 15, para dirigir los haces luminosos colectados 17 hacia el interferómetro 15.

30 El interferómetro 15 es apto para introducir una diferencia de camino óptico (δ) para crear interferencias a partir de dichos haces luminosos colectados 17.

En particular, las interferencias se utilizan separando en dicho interferómetro 15 de cada haz luminoso colectado 17 e introduciendo una diferencia de camino óptico (δ) entre los haces luminosos así separados.

35 Ventajosamente, se utiliza un interferómetro que comprende por lo menos una placa separadora para separar cada haz luminoso colectado hacia por lo menos dos caminos del interferómetro, comprendiendo cada camino unos elementos ópticos reflectores y/o semi-reflectores para introducir la diferencia de camino óptico (δ) entre los haces luminosos separados por una placa separadora. La nueva combinación de los haces luminosos separados de este modo permite crear las interferencias.

40 Un interferómetro que comprende dos caminos ópticos y que hace interferir dos haces luminosos es conocido por el experto en la materia con el nombre de interferómetro de dos ondas.

Se debe observar que se puede utilizar cualquier tipo de interferómetro, como se detallará a continuación.

45 Se mide la intensidad de haces luminosos 26 procedentes de dichas interferencias a la salida de dicho interferómetro 15 mediante por lo menos un detector óptico 16. El interferómetro puede comprender una o varias salidas y uno o varios detectores ópticos por salida.

50 Cualquier interferómetro está caracterizado por una o varias funciones de transferencia, que corresponde a su poder de transmisión (T) de los haces luminosos entre una de las entradas de dicho interferómetro y una de las salidas de dicho interferómetro en función de la frecuencia del haz luminoso. Esta transmisión corresponde al cociente entre la intensidad del haz luminoso a la salida del interferómetro y la intensidad del haz luminoso a la entrada del interferómetro.

55 En particular, el experto en la materia sabe que dicha transmisión (T) es periódica en función de la frecuencia (f) del haz luminoso que penetra en el interferómetro, con el período igual a la celeridad (c) de la luz en el vacío dividida por la diferencia de camino óptico (δ) introducida en el interferómetro para crear unas interferencias a partir de dicho haz luminoso que penetra en el interferómetro. Dicha transmisión (T) se escribe:

$$T\left(f + m \frac{c}{\delta}\right) = T(f),$$

60 siendo m un entero y c la celeridad de la luz en el vacío ($c=3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

En el dispositivo 10 de teledetección láser según la invención, la fuente láser 13 y el interferómetro 15 están concebidos y se eligen de manera que el producto del intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) del haz luminoso emitido 11 por la fuente láser 13 por la diferencia de camino óptico (δ) del interferómetro 15 sea igual a la celeridad (c) de la luz en

el vacío. Esa relación se escribe:

$$\Delta f_{ISL} \delta = c \Leftrightarrow \Delta f_{ISL} = \frac{c}{\delta}$$

Con esta relación estructural entre la fuente láser 13 y el interferómetro 15, la transmisión (T) del interferómetro se reescribe:

$$T(f + m\Delta f_{ISL}) = T(f)$$

Gracias a la relación estructural que existe entre la fuente láser 13 y el interferómetro 15, todos los modos frecuenciales emitidos por la fuente láser 13 tendrán una transmisión idéntica a través del interferómetro 15. En efecto, la transmisión de un modo frecuencial emitido por la fuente láser en la frecuencia $f_0 + n\Delta f_{ISL}$ se escribirá:

$$T((f_0 + n\Delta f_{ISL}) + m\Delta f_{ISL}) = T(f_0 + (n + m)\Delta f_{ISL}) = T(f_0)$$

Cada modo frecuencial emitido por la fuente láser 13 hacia el volumen 12 de materia, y después difundido por dicho volumen 12 en dirección al interferómetro 15 será por lo tanto filtrado por el interferómetro 15 de forma idéntica.

Esto implica que ya no es necesario utilizar un haz luminoso emitido en una única frecuencia, como era el caso en los dispositivos de la técnica anterior.

Además, ya no es necesario condicionar la frecuencia de emisión de la fuente láser 13 a la función de transferencia del interferómetro 15 tal como era en el caso de la técnica anterior.

Esto es muy ventajoso ya que el dispositivo de teledetección láser es más sencillo y menos costoso. En particular, la utilización de una fuente láser de emisión multimodo es fácil, ya que este tipo de fuente láser se utiliza de forma habitual y no precisa ningún aparellaje pesado.

El dispositivo de teledetección según la invención es asimismo menos sensible a las perturbaciones mecánicas y/o térmicas.

Se ha representado en la figura 5 un ejemplo de interferómetro 15, denominado de Mach-Zehnder, que puede ser utilizado en el dispositivo (10) de teledetección láser según la invención. Ese interferómetro es un ejemplo de interferómetro de dos ondas.

Ese interferómetro 15 comprende por lo menos una placa separadora 20 para separar cada haz luminoso colectado 17 hacia dos caminos 21, 27 del interferómetro 15, comprendiendo cada camino 21, 27 unos elementos ópticos reflectores y/o semi-reflectores para introducir la diferencia de camino óptico (δ) entre los haces luminosos separados por la placa separadora 20.

Uno de los caminos 21 corresponde al recorrido del haz luminoso colectado 17 entre la placa separadora 20 y una placa separadora de salida 33.

El otro camino 27 corresponde al recorrido del haz luminoso colectado 17 entre la placa separadora 20, un primer y un segundo espejo 31, 32 y la placa separadora de salida 33.

Los espejos 31, 32 y las placas separadoras 20, 33 están posicionados de manera que la diferencia de camino óptico (δ) introducida entre los dos caminos 21, 27 sea igual a la celeridad (c) de la luz en el vacío dividida por el intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) del haz luminoso 11 emitido por la fuente láser.

Por ejemplo, para una fuente láser 13 que emite un haz luminoso 11 cuyo intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) es de 1 GHz, la diferencia de camino óptico δ se elige igual a $c/\Delta f_{ISL}$, es decir 300 mm.

El interferómetro comprende una entrada 29 y dos salidas 34, 35, comprendiendo cada una de las salidas un detector óptico 37, 38. Cada detector óptico 37, 38 es ventajosamente un detector fotométrico apto para medir la intensidad de los haces luminosos procedentes las interferencias a la salida 34, 35 del interferómetro.

También es posible utilizar un interferómetro apto para crear unas franjas de interferencia a partir de los haces luminosos colectados. En este caso, el detector óptico es un captador de imágenes, que tomará una imagen de dichas franjas de interferencia.

Un ejemplo de dicho interferómetro es un interferómetro Fabry-Perot o un interferómetro Fizeau, que comprende dos superficies planas espaciadas y parcialmente reflectantes, que forman una cavidad. El haz luminoso colectado que penetra en este interferómetro efectúa múltiples idas y vueltas en el interior de esta cavidad, y vuelve a salir parcialmente en cada reflexión. Los diferentes haces luminosos salientes interfieren entre ellos, dando lugar a una figura de interferencias de ondas múltiples constituida por anillos concéntricos finos. Este tipo de interferómetro es

conocido por el experto en la materia con el nombre de interferómetro de ondas múltiples.

Se describirá a continuación un procedimiento de interferometría que utiliza el dispositivo 10 de teledetección láser según la invención, así como la medición de características físicas de un volumen 12 de materia mediante dicho procedimiento, haciendo referencia a las figuras 3 y 5.

Como se ha descrito anteriormente, un haz luminoso 11 es emitido hacia dicho volumen 12 de materia a partir de una fuente láser 13 de emisión espectral multimodo, presentando el espectro de dicho haz varios modos frecuenciales separados por un intervalo espectral libre Δf_{ISL} . Cada modo está centrado alrededor de una frecuencia $f_0 + n \cdot \Delta f_{ISL}$, siendo n un entero y f_0 la frecuencia central de emisión de la fuente láser. La intensidad del haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13 se anota I_0 .

Como respuesta al haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13, el volumen 12 de materia difunde unos haces luminosos 22. El dispositivo colector 12 colecta entonces los haces luminosos difundidos 22 por dicho volumen 12 de materia y los dirige hacia la entrada del interferómetro 15.

Cada haz luminoso colectado 17 se separa en dicho interferómetro 15, en el que una diferencia de camino óptico (δ) introducida entre los haces luminosos separados de ese modo permite crear unas interferencias.

Como se ha expuesto anteriormente, el producto de la diferencia de camino óptico (δ) del interferómetro 15 por el intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) de la fuente láser 13 es igual a la celeridad (c) de la luz en el vacío.

A la salida del interferómetro 15, la intensidad de los haces luminosos 26 procedentes de dichas interferencias se mide mediante por lo menos un detector óptico 16.

De forma ventajosa, las mediciones efectuadas por el detector óptico 16 son tratadas por un procesador para deducir de ellas unas características físicas del volumen 12 de materia. El procesador puede estar integrado en el dispositivo 10 de teledetección, o en su caso, ser externo al dispositivo 10 de teledetección.

Cuando el dispositivo 10 de teledetección láser se utiliza en el campo de la física de la atmósfera, las características físicas medidas son, de forma ventajosa, la velocidad del volumen 12 de materia según el eje de mira 30 del dispositivo 10 de teledetección y/o la relación de difusión del volumen 12 de materia entre las moléculas 18 y las partículas 19.

Esa relación de difusión se define como $R = (I_m + I_p) / I_m$, siendo I_p y I_m respectivamente los coeficientes de retrodifusión de partículas y de moléculas correspondiente a la fracción del haz luminoso 11 reenviada respectivamente por las partículas y las moléculas hacia el dispositivo 10 de teledetección. Cada coeficiente de retrodifusión I_p , I_m corresponde respectivamente al cociente entre la intensidad reemitida y la intensidad recibida por las partículas y las moléculas.

Por otra parte, es ventajoso efectuar unas mediciones de referencia midiendo la intensidad de haces luminosos procedentes de interferencias de referencia producidas por lo menos por un haz luminoso de referencia emitido por la fuente láser 13 y directamente transmitido al interferómetro 15. Por consiguiente, ese haz luminoso de referencia no ha interactuado con el volumen 12 de materia.

La fuente láser 13 emite así un haz luminoso que es transmitido directamente al interferómetro 15, por ejemplo mediante una fibra óptica entre la fuente láser y el interferómetro.

La intensidad de los haces luminosos procedentes de las interferencias de referencia y medida a la salida del interferómetro 15 por el detector óptico se compara entonces con la intensidad de los haces luminosos procedentes de las interferencias producidas a partir de los haces luminosos difundidos por el volumen 12 de materia y dirigidos hacia el interferómetro 15 mediante el dispositivo colector 14.

Según un modo de realización de la invención, el interferómetro 15 es un interferómetro Mach-Zehnder. En la configuración de la figura 6, comprende una entrada 29 y cuatro salidas 33, 34, 35, 36.

El interferómetro 15 comprende dos caminos 21, 27 de longitud óptica diferente, que permiten introducir una diferencia de camino óptico (δ), y, por lo tanto crear unas interferencias.

Asimismo, el interferómetro 15 comprende una placa de separación 20 para separar cada haz luminoso colectado 17 que penetra en el interferómetro 15. Comprende además una placa de fase 41 posicionada sobre por lo menos uno de los caminos 27 del interferómetro 15, una placa separadora de salida 33 para recombinar y luego separar los haces luminosos procedentes de cada camino 21, 27 del interferómetro y que interfieren a nivel de dicha placa separadora de salida 33, y por lo menos un cubo separador de polarización 42, 43 para separar las polarizaciones de los haces luminosos procedentes de la placa separadora de salida 33.

De este modo, cada haz luminoso colectado 17 se separa hacia los dos caminos 21, 27 del interferómetro mediante la placa de separación 20. Uno de los haces procedentes de esta separación se refleja en un primer espejo 31, atraviesa una placa de fase 41, y se refleja en un segundo espejo 32 hacia una placa separadora de salida 33.

- 5 La placa de fase es de forma ventajosa una placa de cuarto de onda, que presenta dos ejes principales de desfase y que introduce un desfase de 90° entre los dos componentes del haz luminoso que atraviesa dicha placa.

El otro de los haces luminosos procedentes de la placa separadora 20 se dirige directamente hacia la placa separadora de salida 33.

- 10 Los haces procedentes de la separación realizada por la placa de separación 20 interfieren a nivel de la placa separadora de salida 33 y se separan de nuevo en dos haces mediante dicha placa separadora de salida 33. Cada uno de los haces procedentes de la placa separadora de salida 33 encuentra un cubo separador de polarización 42, 43 que permite separar las polarizaciones de cada uno de estos haces, que corresponden a los dos ejes principales de desfase de la placa de cuarto de onda.

En total, cuatro haces luminosos salen por lo tanto del interferómetro 15, y su intensidad se mide a nivel de las cuatro salidas 33, 34, 35, 36 del interferómetro 15 por medio de cuatro detectores ópticos 37, 38, 39, 40 de tipo captador fotométrico.

- 20 La función de transferencia entre la entrada y cada una de las salidas del interferómetro, es decir la transmisión (T) de los haces luminosos en función de la frecuencia (f) de dichos haces luminosos que penetran en el interferómetro se escribe según las siguientes ecuaciones:

$$T_{29 \rightarrow 33}(f) = \frac{1}{4} (1 + \sin(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot f}{c}))$$

$$T_{29 \rightarrow 34}(f) = \frac{1}{4} (1 + \cos(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot f}{c}))$$

$$T_{29 \rightarrow 35}(f) = \frac{1}{4} (1 - \sin(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot f}{c}))$$

$$T_{29 \rightarrow 36}(f) = \frac{1}{4} (1 - \cos(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot f}{c})),$$

- 30 en las que $T_{i \rightarrow j}$ corresponde a la transmisión de un haz luminoso que penetra en el interferómetro a nivel de la entrada (i) y que vuelve a salir a nivel de la salida (j).

- 35 Las transmisiones $T_{i \rightarrow j}$ están esquematizadas en la figura 7. Como se puede constatar, a cada frecuencia (f) del haz luminoso 17 que penetra en el interferómetro 15 corresponde un cuádruple de valores de transmisión. Este cuádruple es único, lo cual permite retirar las indeterminaciones de frecuencia que pueden existir en determinados interferómetros que únicamente comprenden dos salidas. La configuración del interferómetro 15, que comprende cuatro salidas de transmisión diferente, es por lo tanto ventajosa.

- 40 Cada detector óptico 37, 38, 39, 40 mide una señal cuya intensidad S es una convolución espectral de la transmisión T entre la entrada y cada salida del interferómetro por el espectro frecuencial del haz luminoso colectado 17 que penetra en el interferómetro. La intensidad S_i medida por cada detector i se puede modelizar en la forma:

$$S_{37}(f) = \frac{1}{4} I_0 (1 + M \sin(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot (f_0 + df)}{c}))$$

$$S_{38}(f) = \frac{1}{4} I_0 (1 + M \cos(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot (f_0 + df)}{c}))$$

$$S_{39}(f) = \frac{1}{4} I_0 (1 - M \sin(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot (f_0 + df)}{c}))$$

$$S_{40}(f) = \frac{1}{4} I_0 (1 - M \cos(\frac{2\pi \cdot \delta \cdot (f_0 + df)}{c}))$$

En estas expresiones, el término df corresponde al desplazamiento Doppler causado por el desplazamiento del

volumen 12 de materia. Así, $df = 2(v/c) \cdot f_0$, siendo v la velocidad del volumen 12 de materia en el eje de mira 30 del dispositivo de teledetección, y c la celeridad de la luz en el vacío.

Por otra parte, el término M corresponde al contraste de las interferencias producidas a la salida del interferómetro, y depende en particular de la composición del volumen 12 de materia y, de forma accesoria, del interferómetro 15.

Esas medicadas de intensidad S permiten determinar la relación de difusión entre las moléculas y las partículas.

En efecto, las partículas 19 retrodifundirán el haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13, desplazando el espectro de dicho haz luminoso 11 pero sin modificar su anchura espectral. Por consiguiente, los haces luminosos difundidos 22 por las partículas 19 y dirigidos hacia el interferómetro 15 por el dispositivo colector crearán unas interferencias cuyo contraste M_p es elevado.

Por el contrario, las moléculas 18 retrodifundirán el haz luminoso 11 emitido por la fuente láser 13 desplazando y ampliando el espectro de dicho haz luminoso, debido a la agitación térmica de dichas moléculas 18. Por consiguiente, los haces luminosos difundidos por las moléculas y dirigidos hacia interferómetro 15 por el dispositivo colector 14 crearán unas interferencias cuyo contraste M_m es claramente inferior a M_p .

Los valores de contraste M_p y M_m están modelizados a partir del conocimiento *a priori* de la composición del volumen 12 de materia y, en su caso, del tipo de interferómetro. Se pueden modelizar a partir de simulaciones o mediciones *in situ*.

La relación de difusión R entre las moléculas y las partículas se determina entonces a partir de las intensidades S medidas por los detectores ópticos 37, 38, 39, 40 a través de las relaciones:

$$R = \frac{(M_p - M_m)}{(M_p - M)},$$

siendo

$$M = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2} \text{ y } Q_1 = \frac{S_{37} - S_{39}}{S_{37} + S_{39}}, Q_2 = \frac{S_{40} - S_{38}}{S_{40} + S_{38}}$$

De forma alternativa, es ventajoso estimar la velocidad del volumen 12 de materia según el eje de mira 30 del dispositivo 10 de teledetección.

Para mejorar la precisión de la estimación de la velocidad, la fuente láser 13 emite un haz luminoso que se dirige directamente hacia el interferómetro 15, con el fin de constituir unas interferencias de referencia.

Los detectores ópticos miden entonces unas intensidades de referencia S_{37}^{ref} , S_{38}^{ref} , S_{39}^{ref} , S_{40}^{ref} . Estas intensidades corresponden respectivamente a las intensidades $S_{37}(f)$, $S_{38}(f)$, $S_{39}(f)$ y $S_{40}(f)$, siendo $M=M_p$ y $df=0$.

La velocidad del volumen de materia según el eje de mira 30 del dispositivo 10 de teledetección se determina por medio de las expresiones:

$$V = \frac{c^2}{4\pi df_0} \left(\arctan\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) - \arctan\left(\frac{Q_{01}}{Q_{02}}\right) \right),$$

siendo

$$Q_{01} = \frac{S_{37}^{ref} - S_{39}^{ref}}{S_{37}^{ref} + S_{39}^{ref}} \text{ y } Q_{02} = \frac{S_{38}^{ref} - S_{40}^{ref}}{S_{38}^{ref} + S_{40}^{ref}}$$

Las expresiones que permiten determinar la relación de difusión de las partículas y de las moléculas así como la velocidad del volumen de materia según el eje de mira del dispositivo de teledetección se pueden extrapolar a cualquier otro tipo de interferómetro.

Puede tratarse de interferómetros de dos ondas (Mach-Zehnder, Michelson) o de interferómetros de múltiples ondas (Fabry-Pérot, Fizeau).

En el caso de interferómetros con una configuración diferente de la de la figura 6, las expresiones de las transmisiones entre las entradas y las salidas del interferómetro así como las combinaciones de las diferentes

intensidades medidas que permiten determinar la relación de difusión y/o la velocidad del volumen de materia, se modificarán en función del tipo de interferómetro y de su configuración.

5 En el caso de que se utilice un interferómetro apto para utilizar unas franjas de interferencia, se deduce de la posición y del contraste de dichas franjas medidas por uno o varios captadores de imagen la relación de difusión de las moléculas y partículas así como la velocidad del volumen 12 de materia en el eje de mira del dispositivo 10 de teledetección.

10 El dispositivo 10 de teledetección láser según la invención ofrece una solución sencilla, eficaz y robusta, que permite una utilización en tierra o en vuelo, en numerosos campos técnicos (geografía, geología, sismología, teledetección y física de la atmósfera...).

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo (10) de teledetección láser, que comprende:

- 5 una fuente láser (13), apta para emitir un haz luminoso (11) hacia un volumen (12) de materia;
- un dispositivo óptico colector (14) para coleccionar unos haces luminosos difundidos por dicho volumen (12) como respuesta al haz luminoso (11) emitido por la fuente láser (13);
- 10 un interferómetro (15) capaz de introducir una diferencia de camino óptico (δ) para crear unas interferencias a partir de los haces luminosos coleccionados, y
- por lo menos un detector óptico (16) para medir la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas interferencias a la salida del interferómetro (15);

15 estando dicho dispositivo (10) de teledetección láser caracterizado porque:

la fuente láser (13) es de emisión espectral multimodo, de manera que el espectro de dicho haz luminoso (11) emitido por dicha fuente láser (13) presenta varios modos frecuenciales separados por un intervalo espectral libre (Δf_{ISL}), y

20 el producto de dicho intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) por la diferencia de camino óptico (δ) del interferómetro (15) es igual a la celeridad (c) de la luz en el vacío.

25 2. Dispositivo según la reivindicación 1, en el que la fuente láser (13) es un láser pulsado de estado sólido.

3. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 o 2, en el que el interferómetro (15) comprende:

30 por lo menos una placa separadora (20) para separar cada haz luminoso coleccionado hacia por lo menos dos caminos (21, 27) del interferómetro (15);

comprendiendo cada camino (21, 27) unos elementos ópticos reflectores y/o semi-reflectores para introducir la diferencia de camino óptico (δ) entre los haces luminosos separados por la placa separadora (20).

35 4. Dispositivo según la reivindicación 3, caracterizado porque el interferómetro comprende:

una placa de fase (41) posicionada sobre por lo menos uno de los caminos (27) del interferómetro (15);

40 una placa separadora de salida (33) para recombinar y luego separar los haces luminosos procedentes de cada camino del interferómetro;

por lo menos un cubo separador de polarización (42, 43) para separar las polarizaciones de los haces luminosos procedentes de la placa separadora de salida (25).

45 5. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que:

el interferómetro (15) es apto para crear unas franjas de interferencia a partir de los haces luminosos coleccionados, y

50 el detector óptico (16) es un captador de imágenes.

6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1, 2 o 5, en el que el interferómetro es de tipo Fabry-Perot o Fizeau y comprende dos superficies planas espaciadas y parcialmente reflectantes.

55 7. Procedimiento de interferometría en un dispositivo (10) de teledetección láser, caracterizado porque comprende las etapas que consisten en:

60 - emitir un haz luminoso (11) hacia un volumen (12) de materia a partir de una fuente láser (13) de emisión espectral multimodo, presentando el espectro de dicho haz varios modos frecuenciales separados por un intervalo espectral libre (Δf_{ISL}),

- coleccionar unos haces luminosos difundidos por dicho volumen (12) de materia por medio de un dispositivo colector (14) como respuesta al haz luminoso emitido por la fuente láser (13), y dirigirlos hacia un interferómetro (15),

65 - realizar unas interferencias en el interferómetro (15) a partir de dichos haces luminosos coleccionados, mediante

la separación en dicho interferómetro de cada haz luminoso colectado y mediante la introducción de una diferencia de camino óptico (δ),

5 siendo el producto de la diferencia de camino óptico (δ) del interferómetro (15) por el intervalo espectral libre (Δf_{ISL}) de la fuente láser (13) igual a la velocidad (c) de la luz en el vacío, y

- medir la intensidad de los haces luminosos (26) procedentes de dichas interferencias por medio de por lo menos un detector óptico (16).

10 8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que se deducen de la medición de la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas interferencias unas características físicas del volumen (12) de materia.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 u 8, que comprende la etapa que consiste en

15 comparar la medición de la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas interferencias con

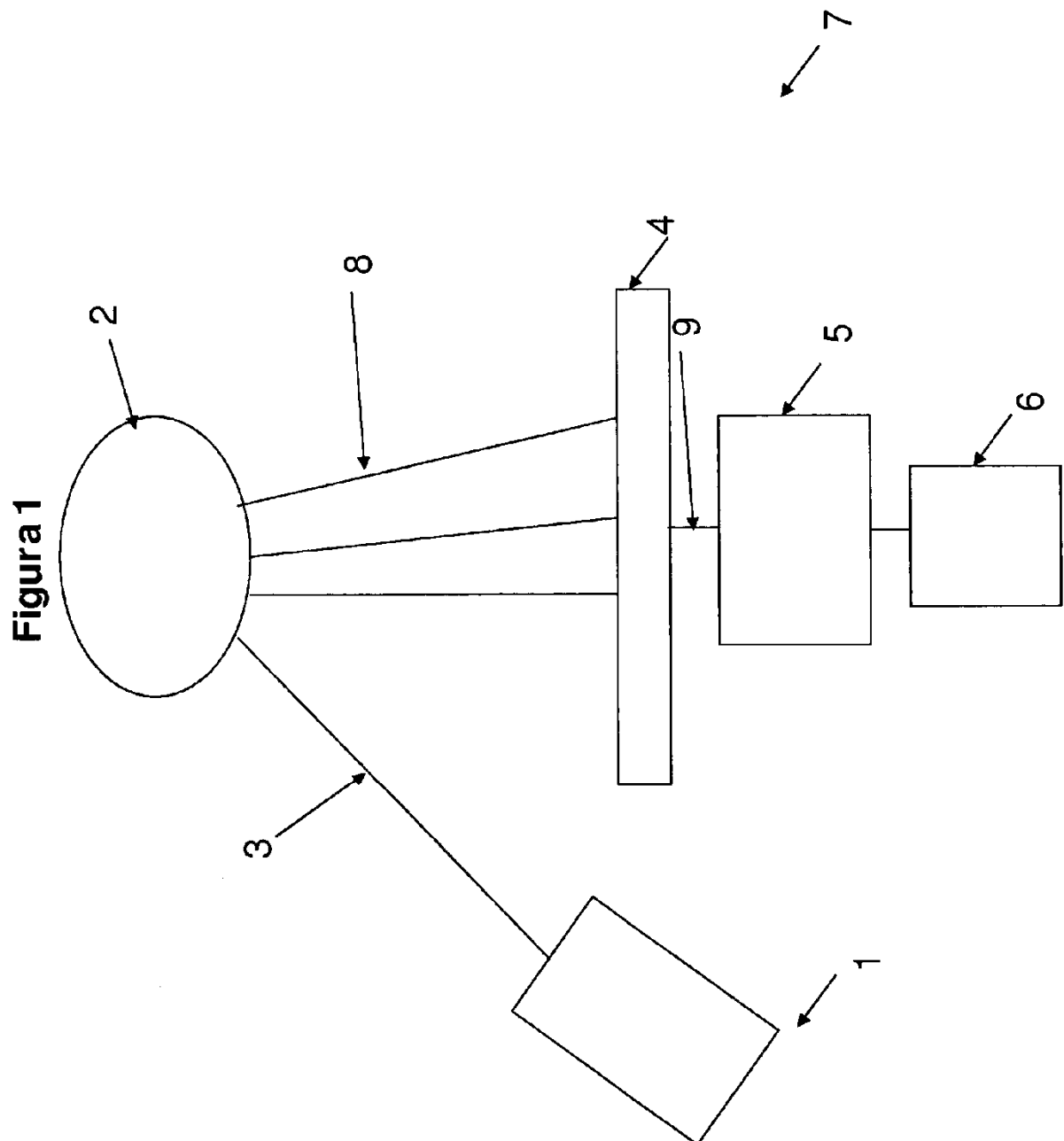
la medición de la intensidad de los haces luminosos procedentes de interferencias de referencia producidas por lo menos por un haz luminoso de referencia emitido por la fuente láser (13) y directamente transmitido al interferómetro (15), para deducir de ella unas características físicas del volumen (12) de materia.

20 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 9, en el que, comprendiendo el volumen (12) de materia unas moléculas (18) y unas partículas (19), se deduce de la medición de la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas interferencias la relación de difusión entre las moléculas (18) y las partículas (19).

25 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 10, en el que se deduce de la medición de la intensidad de los haces luminosos procedentes de dichas interferencias la velocidad del volumen (12) de materia según un eje de mira (24) del dispositivo (10) de teledetección láser.

30 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 11, en el que, siendo el detector óptico un captador de imágenes, el captador de imágenes mide la imagen de franjas de interferencias, y se deduce de la posición y del contraste de dichas franjas las características del volumen de materia.

35 13. Aplicación del procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 12 a la medición de la relación de difusión entre unas moléculas y unas partículas en la atmósfera de un planeta y/o a la medición de la velocidad de un volumen de materia de la atmósfera de un planeta según el eje de mira del dispositivo (10) de teledetección.



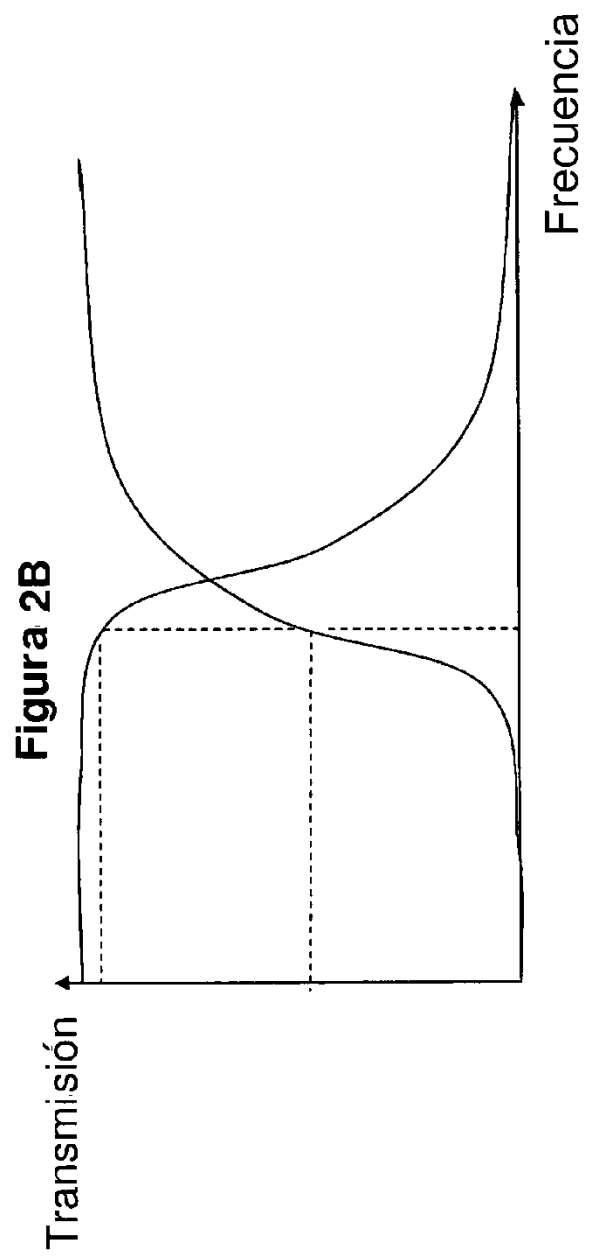
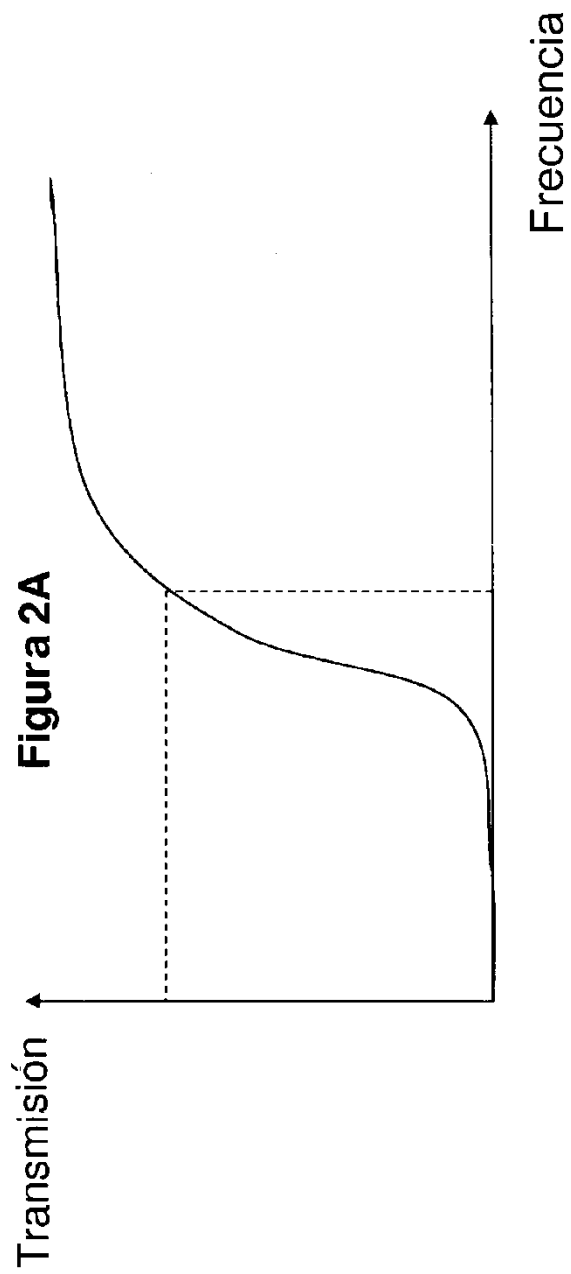


Figura 3

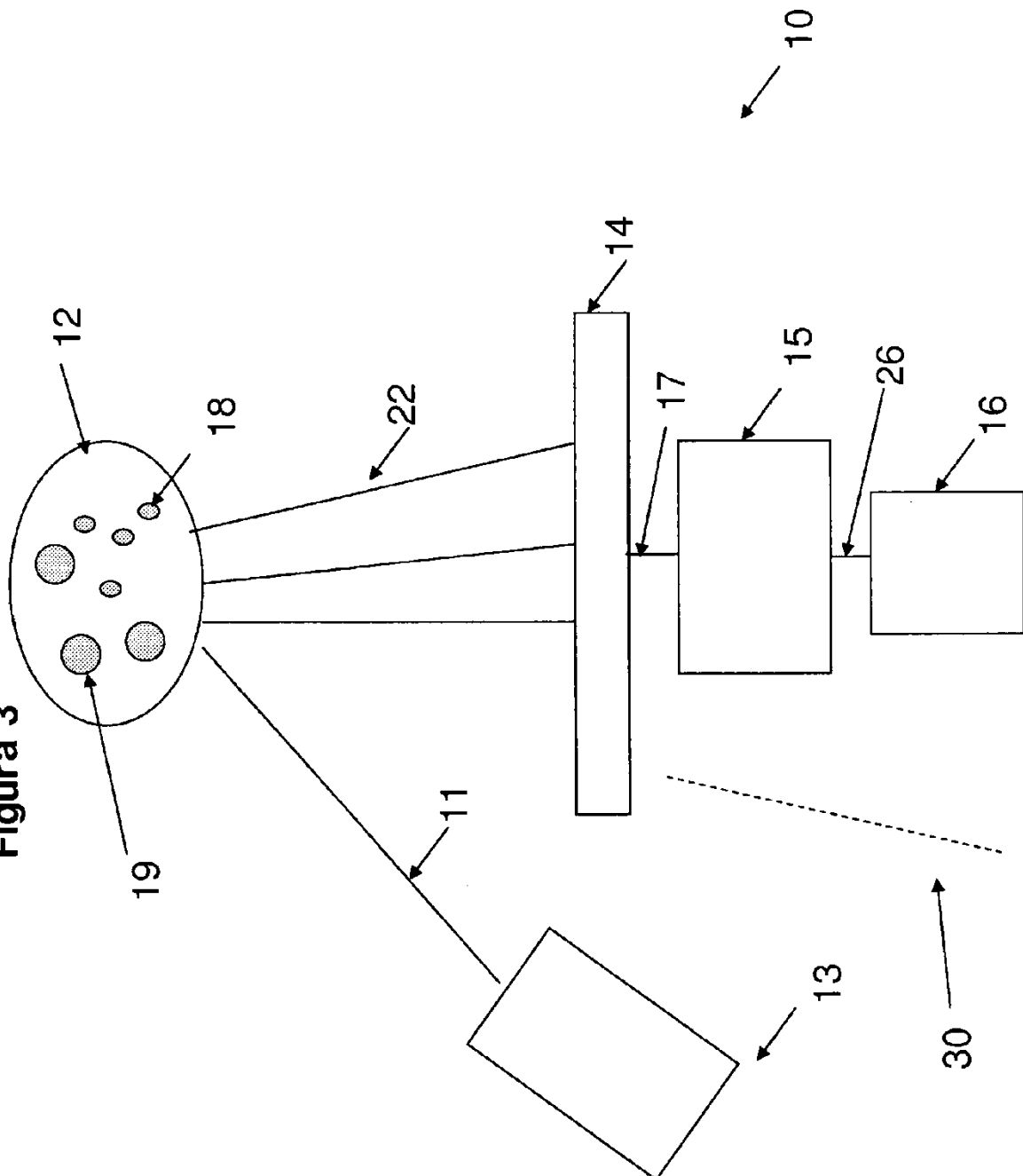


Figura 4

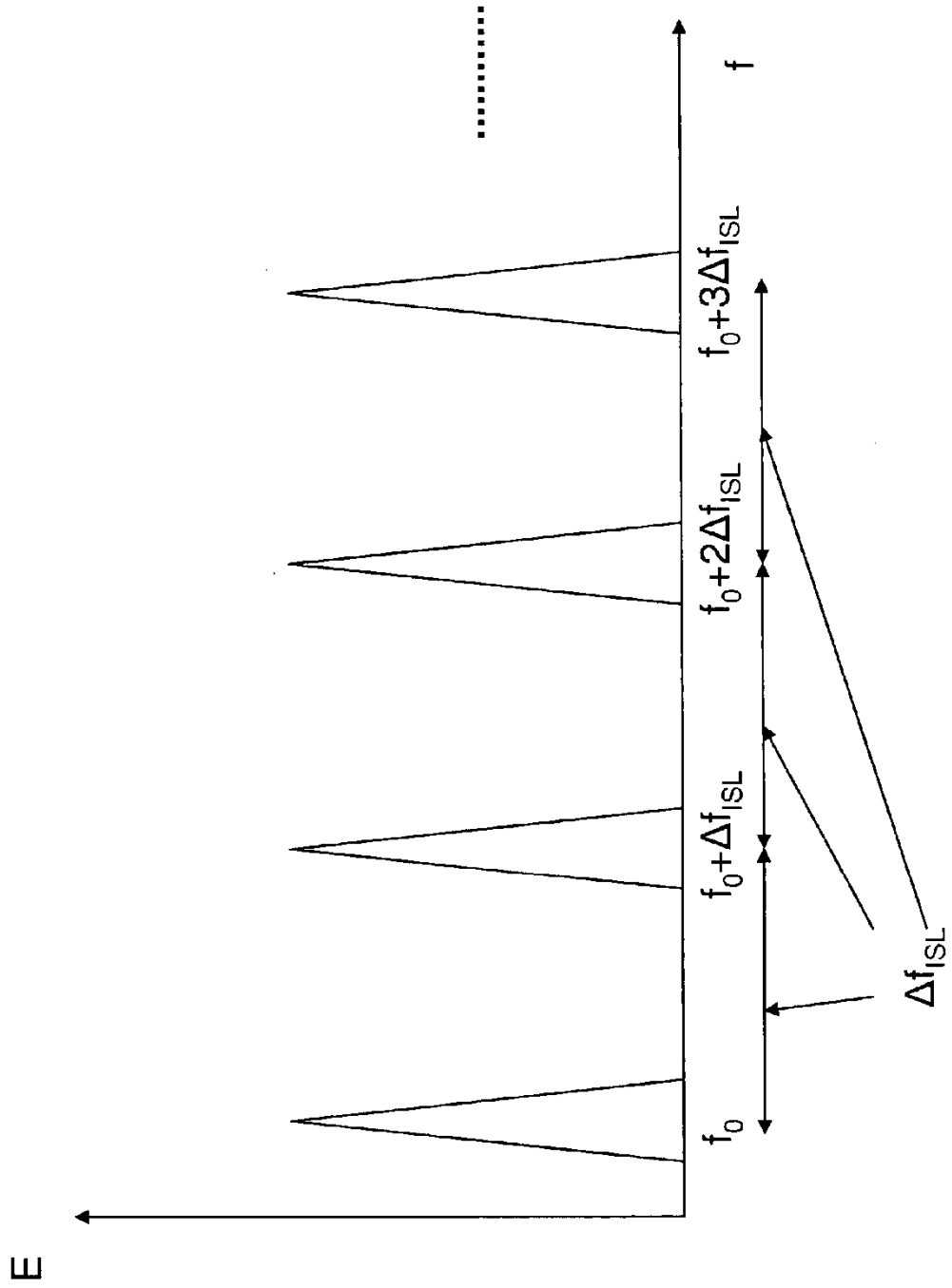


Figura 5

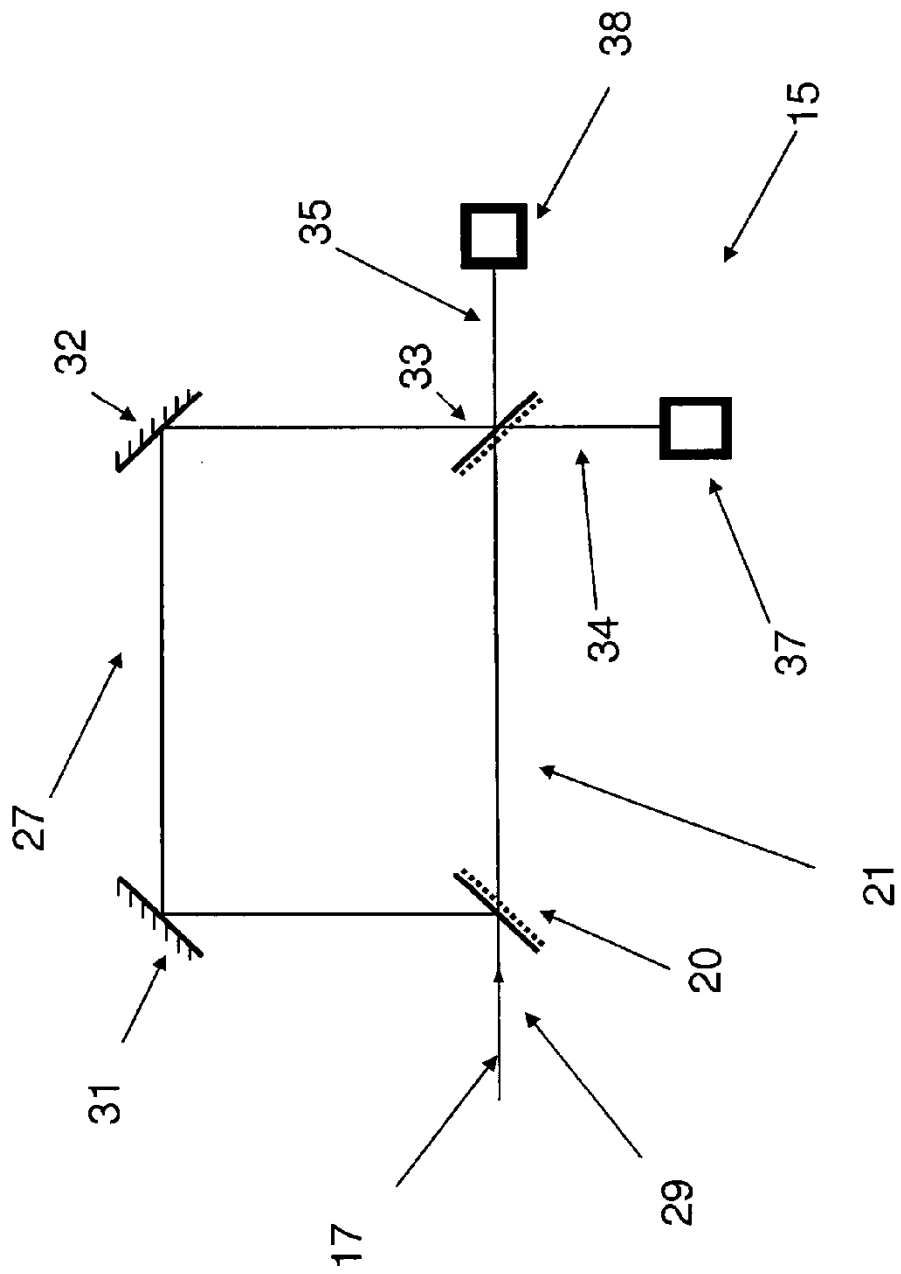


Figura 6

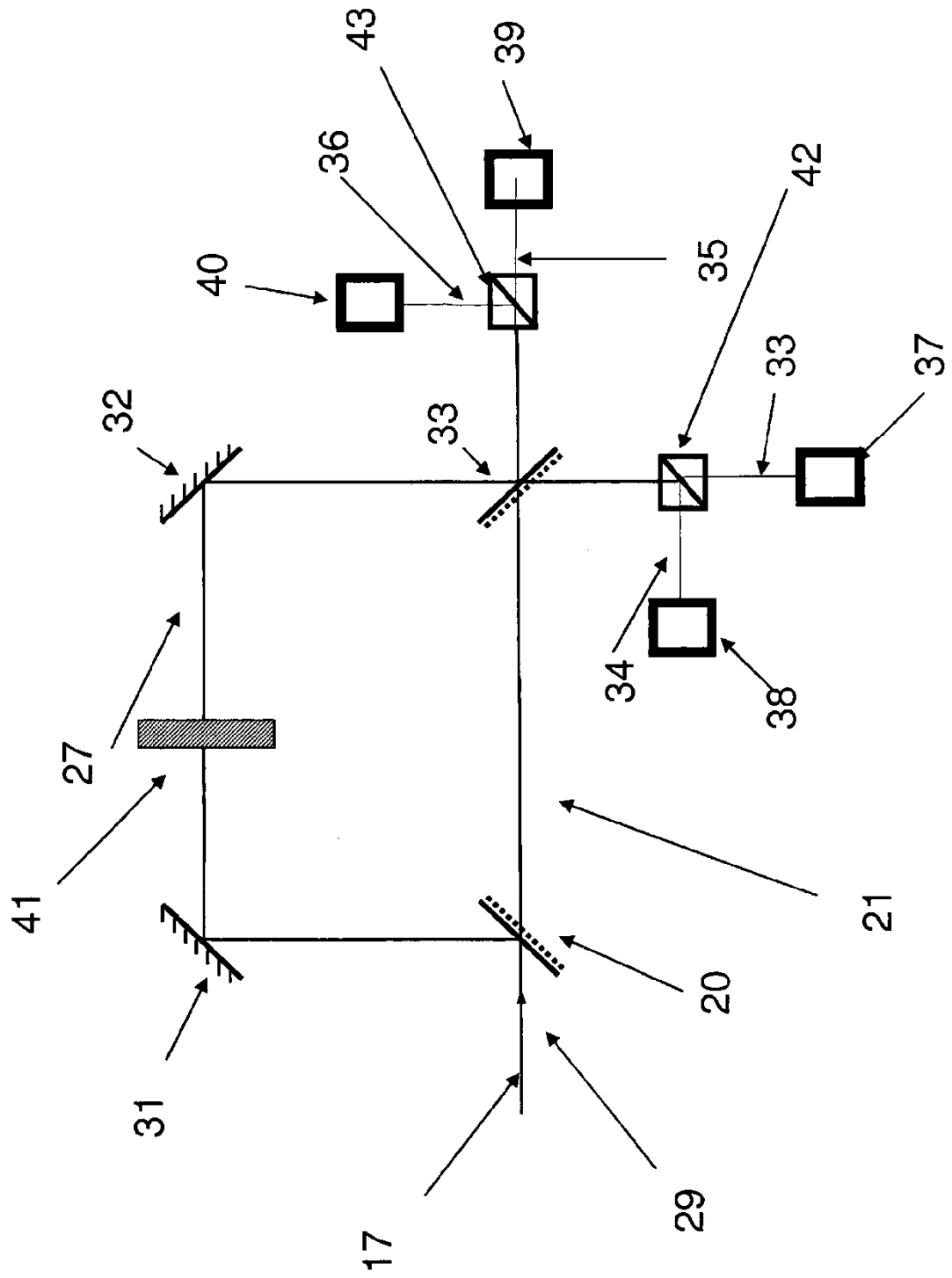


Figura 7

