

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 575 452**

51 Int. Cl.:

G01J 3/02 (2006.01)

G01J 3/28 (2006.01)

G01J 3/45 (2006.01)

G01J 3/453 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.08.2006 E 06794294 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.04.2016 EP 1913350**

54 Título: **Espectrómetro de onda contrapropagante**

30 Prioridad:

08.08.2005 FR 0508429

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

28.06.2016

73 Titular/es:

**UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES (25.0%)
621 Avenue Centrale
38400 Saint-Martin-d'Hères, FR;
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
GRENOBLE (25.0%);
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES
(25.0%) y
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE -CNRS- (25.0%)**

72 Inventor/es:

**LE COARER, ETIENNE;
BENECH, PIERRE;
KERN, PIERRE;
LERONDEL, GILLES;
BLAIZE, SYLVAIN y
MORAND, ALAIN**

74 Agente/Representante:

POINDRON, Cyrille

ES 2 575 452 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

Espectrómetro de onda contrapropagante

5 La presente invención se refiere al campo de la óptica.

La presente invención se refiere de manera más particular a un espectrómetro con transformada de Fourier en óptica guiada que utiliza unas ondas contrapropagantes.

10 Es habitual que unas ondas contrapropagantes en una guía de onda creen interferencias como lo muestra la publicación de Labeyrie y otros (Labeyrie, A., Huignard, J.P. y Loiseaux, B., *Optical data storage in microfibers, Optics Letters*, 23, págs. 301-303 (1998)). El interferograma obtenido lo determina la diferencia de camino óptico recorrido por cada una de las ondas, y el análisis de este interferograma permite obtener información sobre las fuentes luminosas y/o sobre los medios atravesados por estas ondas.

15 Sin embargo, cuando las ondas contrapropagantes interfieren en el interior de una guía de onda, el interferograma obtenido se mantiene confinado dentro de la guía y no es accesible para unas mediciones espectrométricas.

20 La técnica anterior conoce también un espectrómetro por ondas contrapropagantes descrito en la publicación de Froggat y Erdogan (Froggat, M. y Erdogan, T., *All-fiber wavemeter and Fourier-transform spectrometer, Optics Letters*, 24, págs. 942-944 (1999)). Se obtiene un interferograma haciendo que interfieran dos ondas contrapropagantes extraídas de la guía mediante una red de Bragg presente en el interior de la guía. La luz se extrae de la guía con un ángulo que depende de la relación entre la longitud de onda λ y el paso de la red de Bragg Λ : $\sin(\alpha) = n_{\text{eff}}\lambda/\Lambda$ (pág. 943, col., 116-24).

25 En este sistema, la utilización en el interior de la guía de una red periódica es absolutamente necesaria. El paso del interferograma como se ha registrado en el detector depende de este ángulo y del paso de la red de Bragg. Por ejemplo, para una onda monocromática Froggat obtiene un periodo de las franjas: $P_{\text{Froggat}} = 1/2(n_{\text{eff}}\lambda/\Lambda)$. Por el contrario, el interferograma obtenido en la publicación de Labeyrie mencionada con anterioridad depende únicamente de la diferencia de desplazamiento de las ondas desde su punto de división. Por ejemplo, en el caso de una onda monocromática, $P_{\text{Labeyrie}} = 1/2n_{\text{eff}}$.

30 En este sistema, se crea una onda propagante asociada a la señal inyectada. Esta onda propagante es distinta del campo de interferencia y no da un acceso directo al interferograma situado en la guía.

35 Por otra parte, el sistema y, en particular, la estructura periódica de Bragg, altera sin embargo la onda en el interior de la guía.

40 Por otra parte, el sistema anterior solo enseña la inyección de una única onda que se refleja en una onda contrapropagante. Esto plantea el inconveniente de no permitir el acceso a una franja central de eventuales interferencias.

La invención pretende, en particular, resolver estos inconvenientes.

45 La presente invención pretende, por lo tanto, permitir un acceso a este interferograma para unas ondas contrapropagantes guiadas.

50 El acceso al interferograma por interferencia de ondas contrapropagantes tiene también la ventaja de no necesitar ninguna parte móvil para la observación, como es por ejemplo el caso en un interferómetro clásico de tipo Michelson.

55 Para ello, la presente invención se refiere a un espectrómetro 11 que comprende una guía de onda 10 provista de dos accesos, un medio de inyección de dos ondas guiadas contrapropagantes por cada uno de dichos accesos de modo que se cree una interferencia espacial en el interior de dicha guía, un medio de detección de la energía de la onda evanescente del campo guiado procedente de la interferencia de dichas ondas contrapropagantes.

De acuerdo con la invención, se accede al interferograma situado dentro de la guía por medio de la onda evanescente del campo guiado, lo que da un acceso real a este interferograma.

60 Por el contrario, en la publicación de Froggat mencionada con anterioridad, es una red periódica situada en el núcleo de la guía la que extrae cada una de las dos ondas para hacer que interfieran en el detector lo que constituye un interferograma diferente.

65 De preferencia, dicho medio de detección comprende al menos una guía plana (14, 14a, 14b) situada cerca de dicha guía y al menos un fotodetector dispuesto para detectar una onda en la salida de dicha guía plana.

De manera ventajosa, dicho medio de detección comprende una multitud de detectores locales distribuidos entre los dos accesos de dicha guía.

5 De manera ventajosa, dicho medio de detección comprende al menos una punta difusora fija o móvil y al menos un fotodetector.

De acuerdo con una forma de realización, dicho medio de inyección de las dos ondas es un separador de onda dispuesto de modo que dirija las dos partes de una misma onda según los dos accesos de dicha guía.

10 La invención se refiere también a un sistema de formación de imágenes espectroscópicas que comprende una multitud de espectrómetros de acuerdo con la invención, dispuestos en una matriz, estando los medios de inyección en el plano focal de una óptica de entrada.

15 Se entenderá mejor la invención por medio de la descripción, hecha a continuación a título meramente explicativo, de una forma de realización de la invención, en referencia a las figuras adjuntas:

- la figura 1 ilustra una primera forma de realización de la invención en el caso de un espectrómetro contrapropagante cerrado en bucle;
- la figura 2 ilustra una segunda forma de realización de la invención con detección en un plano inclinado;
- 20 – la figura 3 ilustra una forma de realización de la invención con dos prismas;
- la figura 4 ilustra una forma de realización de la invención para una guía con dos entradas;
- la figura 5 ilustra una forma de realización de la invención en el que la detección se realiza mediante una multitud de detectores locales situados en el campo evanescente;
- la figura 6 ilustra una forma de realización de la invención en el que la detección se realiza mediante una punta difusora;
- 25 – la figura 7 ilustra una forma de realización de la invención que comprende un medio de variación de la fase de las señales;
- la figura 8 ilustra una forma de realización de la invención en la que se utiliza una guía en bucle y una multitud de detectores locales;
- 30 – la figura 9 ilustra otra forma de realización de la invención para un bucle cerrado y un medio de variación de la fase.

35 De acuerdo con una primera forma de realización ilustrada en la figura 1, la luz que hay que analizar se introduce dentro del dispositivo 11 en el extremo de la guía de onda 10 bien mediante la conectorización de una fibra óptica, bien mediante una inyección por medio de un dispositivo de óptica de volumen o cualquier otro sistema de inyección de la luz guiada o no.

40 La luz se propaga hasta el componente 12 que separa la onda en dos partes. El interferograma se construye alrededor de la zona 13 que garantiza un desacoplamiento por onda evanescente de la luz de la guía curva. El componente 12 garantiza el paso de las ondas por dos medios de acceso distintos de la guía 10 a la altura de la zona 13. La función oscilante ilustrada en la figura 1 a la altura de la zona 13 representa el interferograma presente en la zona de interferencia 13.

45 La zona 13 está situada a la misma distancia de la zona de separación 12 de la onda según los dos caminos que las unen.

50 El dispositivo 11 comprende también una zona 14 de guía plana de forma que la luz presente dentro de la guía curva puede salir en la zona 14 de manera radial aunque la parte del interferograma que estaba presente dentro de la guía curva se encuentre guiada en la dirección vertical perpendicular al plano de la figura (es decir en el espesor del componente) hasta el borde del soporte 17 estando ampliada geoméricamente en el plano del sistema mediante la relación $R(x)/r$ en la que x es la coordenada a lo largo del borde, r es el radio de curvatura de la guía y $R(x)$ es la distancia radial que separa el punto de coordenada x en el centro de curvatura de la parte de la guía que le corresponde.

55 En esta forma de realización, el paso de las franjas se puede ajustar en función de la relación de distancia R/r de la arista en el centro de curvatura del bucle lo que permite muestrear correctamente en el sentido de Shannon el interferograma con un detector cuya dimensión de los píxeles sería más grande que la cuarta parte de la longitud de onda al contrario que en el espectrómetro de la publicación de Froggat mencionada con anterioridad para el cual el periodo de las franjas depende únicamente de la elección del paso de la red que entonces solo da acceso a un rango espectral estrecho $\lambda^2/(4neff.p)$ alrededor de $\lambda/2$.

60 La zona 14 corresponde, por ejemplo, a una guía plana yuxtapuesta a la guía curva que sirve para controlar el índice de fuga de la luz procedente de la guía curva y para guiar la luz hasta la arista del componente 17. Se entiende que para una guía no curvada, el prisma 14 también se puede utilizar para deslocalizar la detección.

65

En el interior del prisma 14, la onda evanescente del campo guiado procedente de la interferencia de las ondas contrapropagantes se convierte en una onda propagante que permite deslocalizar la detección.

5 Un medio de detección fotosensible 16 está ajustado a lo largo de la zona tangente del soporte de forma que detecte la parte del interferograma extraída de la guía.

10 La reconstrucción de la señal debe tener en cuenta la transformación geométrica que proyecta la abscisa curvilínea a lo largo de la guía hacia la coordenada x. Esta geometría hace que para un detector que tiene unos píxeles regularmente separados, la ley de muestreo del interferograma es tal que $\delta = \arctan(x/R) \cdot r$; δ es la abscisa curvilínea de las diferencias de desplazamiento consideradas a partir del lugar de la franja central para unos caminos ópticos iguales a partir de la zona de separación 12. x representa la distancia geométrica de proyección del interferograma en la arista del componente.

15 La cantidad de luz extraída de la guía en la zona de desacoplamiento 13 de la guía 10 depende de una adaptación geométrica o de índice de refracción entre la guía curva y la guía plana. De este modo, se puede modular la cantidad de luz que debe salir en cada lugar de 13, lo que permite de este modo actuar sobre la apodización del interferograma muestreado en el borde del soporte 17. De este modo, una adaptación constante del índice de fuga conducirá a una distribución exponencial decreciente de la luz a lo largo de la guía curva en la zona 13 que depende del sentido de llegada de la onda en esta parte. La dimensión del sistema depende de la distancia entre los
20 elementos de imagen del detector (pixel). El dimensionamiento se hace, por ejemplo, de la siguiente manera:

25 Se parte de las características del detector 16, siendo dx la dimensión del píxel y N el número de píxeles en la barra. La longitud del detector 16 es entonces $L = N \cdot dx$. En la gama de frecuencias que se quiere analizar, es preciso que el detector sea sensible y que las guías de ondas sean monomodo y propagantes. Se define entonces el intervalo de longitudes de onda de funcionamiento mediante λ_{\min} y λ_{\max} . El muestreo en el centro del interferograma debe permitir situar dos píxeles para una distancia que corresponde a la interfranja en la longitud de onda $\lambda_{\min}/4$ en el medio con un índice n multiplicado por el aumento G causado por la guía 14 plana en virtud del teorema de Shannon de banda ancha. Este aumento en el centro del interferograma es $G = R/r$, tal que:

$$30 \quad dx = G \cdot \lambda_{\min} / 4n.$$

El ángulo de apertura A del prisma 14 debe corresponder a la longitud del detector añadido en el centro de curvatura del bucle de la guía contrapropagante.

$$35 \quad A = 2 \arctan(L/2R).$$

40 Por último, la curvatura r de la guía así como la forma exacta de la guía 14 plana se determina mediante un cálculo electromagnético conocido, por ejemplo en la publicación de K. R. Hiremath y otros (K. R. Hiremath, M. Hammer, R. Stoffer, L. Prkna, J. Ctyroky, *Analytical approach to dielectric optical bent slab waveguides Optical and Quantum Electronics* 37 (1-3), págs. 37-61 (2005)) en función del índice de fuga que se desea dar.

45 De acuerdo con una segunda forma de realización de la invención ilustrada en la figura 2, la zona de guiado 14 tiene una forma disimétrica de modo que se pueda registrar de manera asimétrica un interferograma con respecto a la franja central. Por otra parte, seccionando el plano 17 de forma oblicua con respecto a la simetría del sistema, las franjas que corresponden al centro del interferograma que son más ricos en información sobre el espectro se muestrearan mejor en detrimento del muestreo de las altas frecuencias que presentan a veces un interés menor.

50 De manera similar, también se puede alargar uno de los brazos del interferómetro en una configuración tal como se ilustra en la figura 1. De este modo, el interferograma se encontrará desplazado en la barra del fotodetector en la dirección en la que se ha alargado el bucle de la guía 10.

55 Como se ilustra en la figura 3, el espectrómetro de acuerdo con la invención también puede comprender una multitud de prismas 14a, 14b, asociados a una multitud de detectores 16a, 16b, con el fin de muestrear varias partes distintas del interferograma.

60 De acuerdo con otra forma de realización ilustrada en la figura 4, se puede dividir la onda de forma previa antes de la inyección en los dos accesos de la guía 10a y 10b. Esta configuración está especialmente optimizada para medir la fase del interferograma. La simetría del sistema garantiza una perfecta acromaticidad, por lo tanto una insensibilidad de la medición de la fase en la fluctuación de las longitudes de onda en la señal que hay que medir. Por otra parte, se puede modificar el camino óptico en uno de los canales en el propio componente 21, bien por un efecto electro-óptico que modifica el índice del medio como es el caso para el niobato de litio, o bien por un efecto elasto-óptico o acusto-óptico y cualquier otro procedimiento. Externamente, esta variación del camino óptico puede hacerse un sistema separador de onda y de línea de retardo como un montaje de Michelson por ejemplo. Esta variación permite registrar otras partes del interferograma y aumentar de este modo la resolución espectral del
65 sistema o mejorar el muestreo del interferograma.

De acuerdo con otra variante de la invención, ilustrada en la figura 5, la onda dividida de forma previa se inyecta en el componente en 10a y en 10b por los dos accesos de una guía de onda 10, la onda interfiere dentro de la guía y, unos detectores, unos puntos difusores o unos bolómetros 19 se instalan en la superficie de la guía y, por lo tanto, son sensibles a una fracción del campo presente en el interior de la guía.

5 Por lo tanto, se colocan por ejemplo una multitud de detectores locales fijos 19 en el exterior de la guía 10. Para realizar estos detectores locales, se puede por ejemplo utilizar un material sensible a las ondas evanescentes procedentes de la guía 10. Los detectores 19 muestrean entonces la intensidad de las ondas evanescentes.

10 El experto en la materia entenderá que si se desea detectar una longitud de onda λ , los detectores están separados por una distancia sustancialmente igual a $\lambda/4$, con el fin de reconstruir la señal correspondiente.

15 Para la detección de un espectro policromático de banda ancha, esta distancia debe ser la cuarta parte de la longitud de onda más corta del espectro estudiado. Las longitudes de onda inferiores se detectarían entonces con una eficacia menor e incluso no contribuir nada en absoluto en los sistemas de interferencia.

20 Por el contrario, para la detección de un espectro policromático de banda estrecha, se pueden situar unos detectores a unas distancias superiores a $\lambda/4$ en virtud del teorema de Shannon de banda estrecha si estos detectores presentan una dimensión inferior a la cuarta parte de la longitud de onda más corta del espectro estudiado.

25 La capa detectora 19 comprende, por lo tanto, por ejemplo una multitud de detectores locales equidistantes prestando atención a que una distribución regular puede provocar una perturbación de la transmisión de la onda por un efecto de red de Bragg.

30 Para solucionar este problema, se puede eventualmente colocar un medio fotosensible continuo entre la guía de onda y los detectores locales regularmente separados, o bien colocar los detectores locales de una manera aperiódica como, por ejemplo, una serie de espaciamiento que se definiría por la secuencia de los números primos.

Hay que señalar que estos detectores pueden ser de diferentes formas sin limitación del alcance de la invención.

35 Son, por ejemplo, unas uniones pn fotoconductoras realizadas sobre un sustrato semiconductor adelgazado que consta de unos fotodiodos y de unos electrodos para recoger una corriente en los bornes de los fotodiodos. Este sustrato es adyacente a la guía de onda 10 bien mediante adhesión molecular, o bien mediante encolado.

Los detectores también pueden ser unos microbolómetros por hilos supraconductores que forman una red distribuida entre los dos accesos opuestos de la guía de onda 10.

40 También se puede considerar utilizar unas microantenas, unos fotoconductores de tipo Selenio o unos fotodetectores con efecto Josephson.

45 De manera similar, como se ilustra en la figura 6, el interferograma generado en el interior de la guía 10 es muy sensible al desfase existente entre las dos ondas en las entradas 10a y 10b opuestas de la estructura: el interferograma se desplaza a lo largo de la guía en función de este desfase. Por lo tanto, se puede registrar el interferograma durante su desplazamiento por medio de un detector o de un punto difusor único y fijo o móvil 20 situado sobre la guía.

50 También se pueden sustituir los fotodetectores en el campo evanescente por uno o varios puntos difusores con una dimensión más pequeña que la cuarta parte de la longitud de onda más corta en el sentido de propagación con el fin de convertir el campo evanescente y hacer que se propague hacia un detector situado fuera de la zona evanescente lo que hace posible el empleo de detectores más grandes que la longitud de onda como los píxeles de un CCD, por ejemplo.

55 Bien se impone una variación de fase conocida y esto permite registrar el interferograma (mediciones espectrométricas), bien se mide el desplazamiento del interferograma y esto permite determinar el desfase entre las dos ondas (metrología), o bien por último se desplaza el punto difusor de manera conocida para registrar el interferograma.

60 En la figura 7 se representa un medio para hacer que varíe la fase en el interior del componente, en el caso abierto por acción sobre el camino óptico 21, la separación de la onda es externa y se inyecta en 10a y 10b. La detección del interferograma se realiza mediante la punta o el defecto difusor 20.

65 Como se ilustra en la figura 8, se puede utilizar una guía cerrada con separación de la onda provista de unos detectores locales descritos en referencia a la figura 5. En este caso, aunque la guía no esté curvada, también se puede colocar un prisma como en la figura 1 para observar la figura de interferencia en el borde del dispositivo sin aumento.

De la misma forma, se puede utilizar un elemento difusor en combinación con una división interna de la onda como se ilustra en la figura 9.

5 Por último, la invención se refiere también a un sistema de formación de imágenes espectrométricas que comprende una multitud de espectrómetros como se ha descrito con anterioridad, dispuestos en matriz. En este caso, el sistema obtenido está compuesto por dos lentes lo que permite adaptar la onda a una guía monomodo. Se instala una colección de detectores en el campo evanescente de la guía. Se obtiene por ejemplo un conjunto de detectores CCD que debe tener un paso inferior a la cuarta parte de la longitud de onda teniendo en cuenta el índice del medio en el que se fabrica la guía monomodo. Se debe utilizar un mosaico compuesto por dichos elementos en un sistema
10 óptico que divide el frente de onda y forma la imagen de forma simultánea en las dos caras de este mosaico.

La invención que proporciona un espectrómetro con detección in situ se puede aplicar en numerosos campos que utilizan mediciones espectrográficas como los giroscopios de láser, la metrología o el TCO (Tomografía de Coherencia Óptica) o incluso la sensorica (detección y análisis químico y bioquímico).
15

REIVINDICACIONES

1. Espectrómetro que comprende:

- 5 - una guía de onda (10) provista de dos accesos (10a, 10b, 12);
 - un medio de inyección de dos ondas guiadas contrapropagantes por cada uno de dichos accesos de modo que se cree una interferencia espacial en el interior de dicha guía,

caracterizado por que comprende, además:

- 10 - un medio de detección (19, 20, 14, 16) de la onda evanescente del campo guiado procedente de la interferencia de dichas ondas contrapropagantes que comprende:
- 15 - bien al menos una guía plana (14, 14a, 14b) situada cerca de dicha guía y en la que la onda evanescente del campo guiado procedente de la interferencia de las ondas contrapropagantes se convierte en una onda propagante; y al menos un fotodetector (16, 16a, 16b) previsto para detectar de forma deslocalizada dicha onda propagante en la salida de dicha guía plana,
 - o bien al menos una punta difusora (20), fija o móvil, situada en la superficie de la guía; y al menos un fotodetector.

20 2. Espectrómetro de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que dicho medio de detección comprende una multitud de detectores locales distribuidos entre los dos accesos de dicha guía.

25 3. Espectrómetro de acuerdo con la reivindicación 2, en el que dichos detectores locales tienen una dimensión inferior a la cuarta parte de la longitud de onda de dichas ondas.

30 4. Espectrómetro de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el medio de detección comprende al menos una punta difusora y en el que dicha punta difusora tiene una dimensión inferior a la cuarta parte de la longitud de onda de dichas ondas.

35 5. Espectrómetro de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que dicho medio de inyección de las dos ondas es un separador de onda dispuesto de modo que dirige las dos partes de una misma onda según los dos accesos de dicha guía.

6. Espectrómetro de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el medio de detección comprende al menos una guía plana (14) que tiene una forma disimétrica de forma que se pueda registrar de manera asimétrica un interferograma con respecto a la franja central.

40 7. Espectrómetro de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el medio de detección comprende una multitud de prismas (14a, 14b) asociados a una multitud de detectores (16a, 16b) con el fin de muestrear varias partes distintas del interferograma.

45 8. Sistema de formación de imágenes espectroscópicas caracterizado por que comprende una multitud de espectrómetros de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, dispuestos en una matriz, estando los medios de inyección en el plano focal de una óptica de entrada.

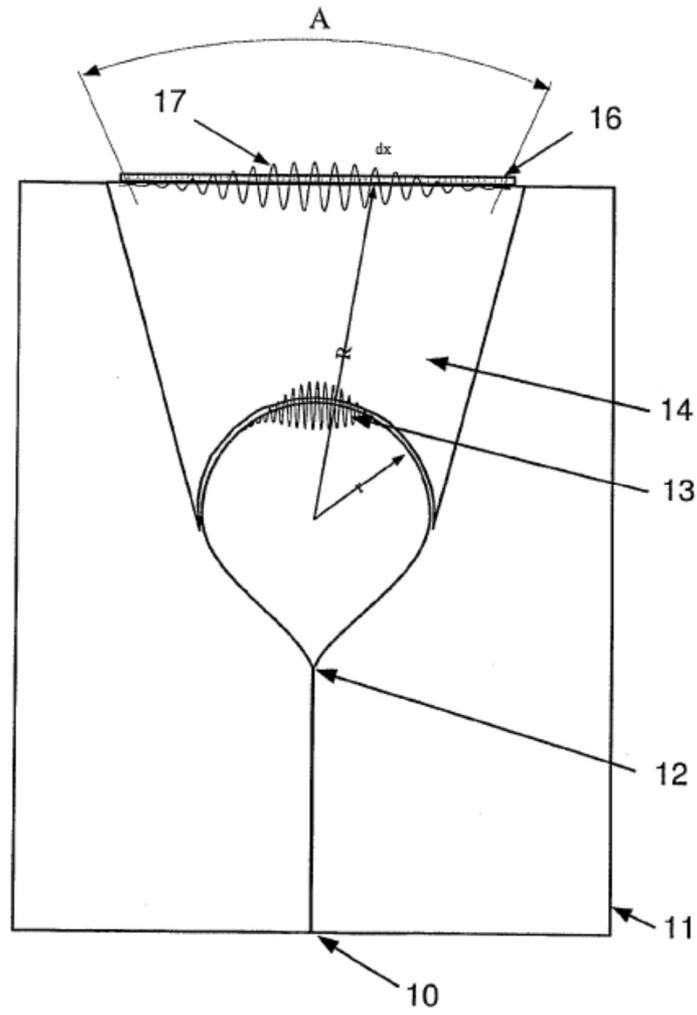


Figura 1

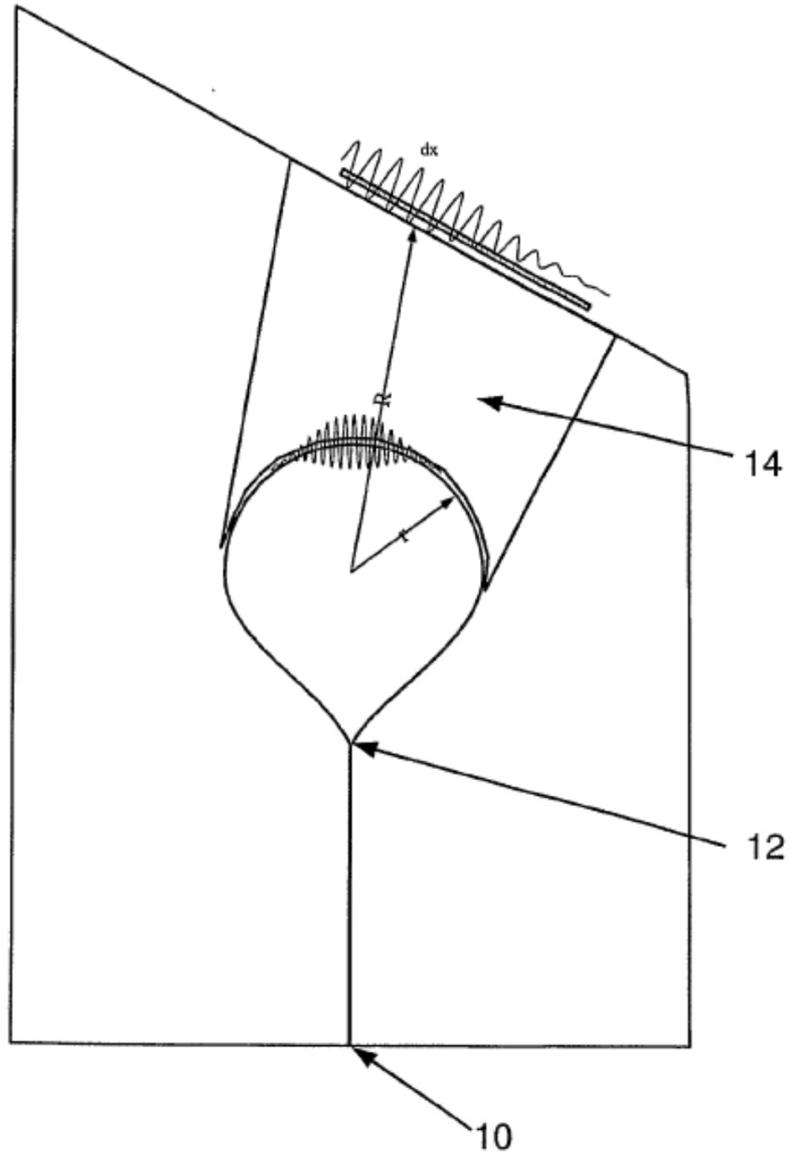


Figura 2

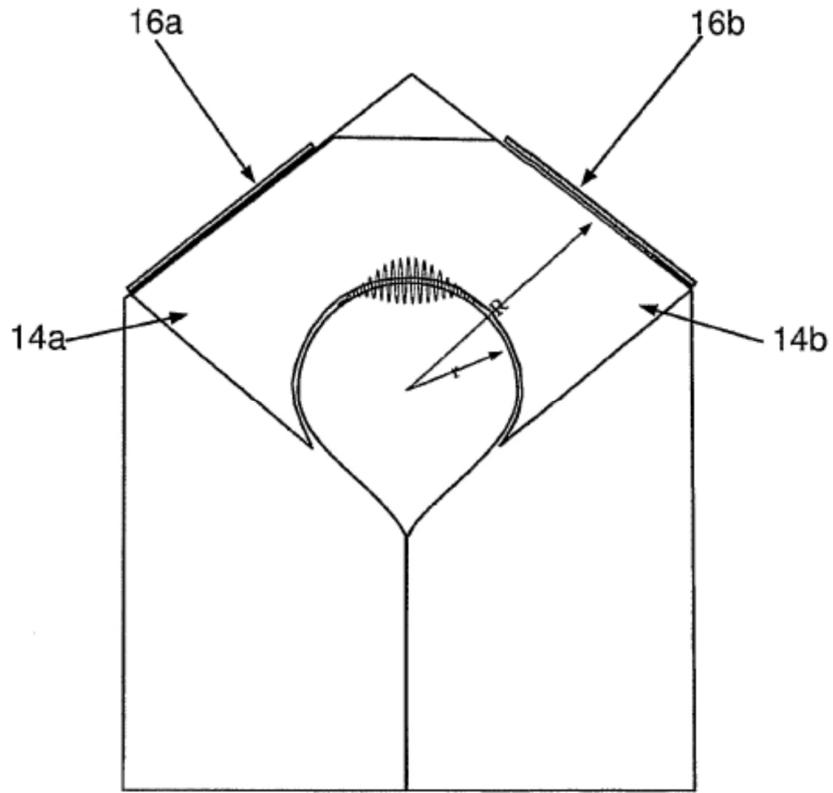


Figura 3

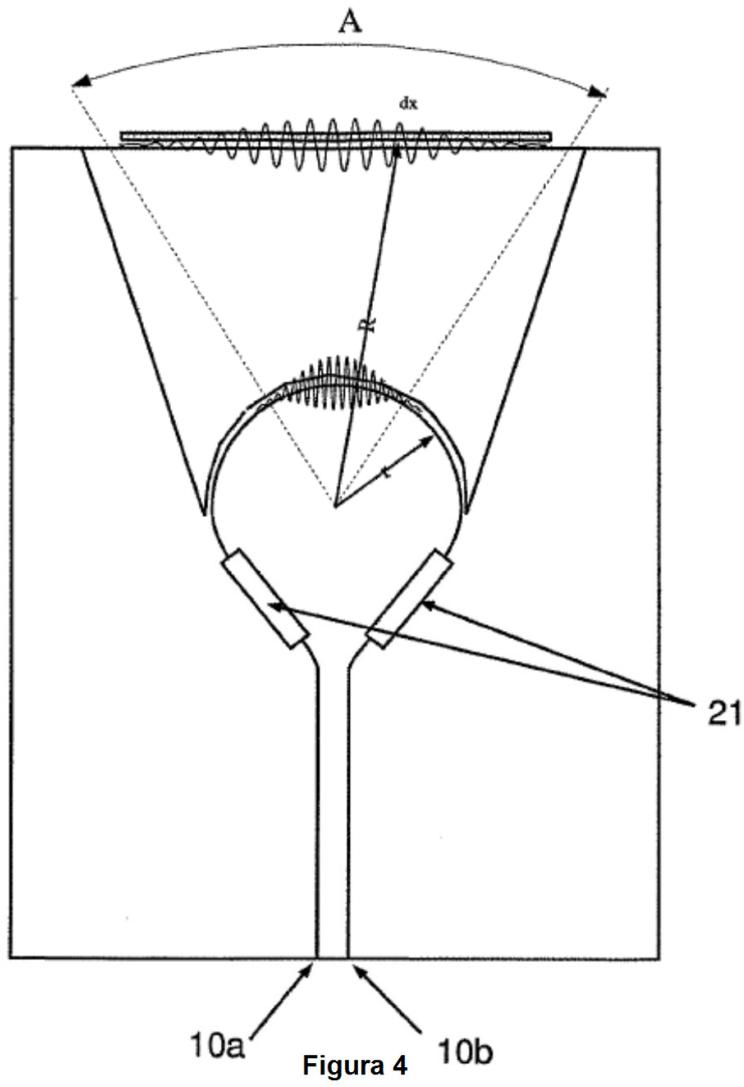


Fig. 4

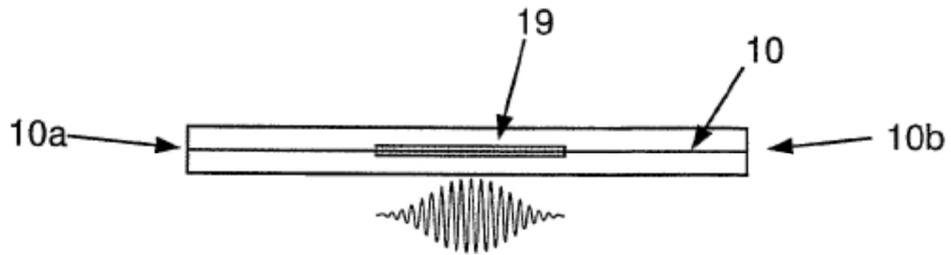


Figura 5

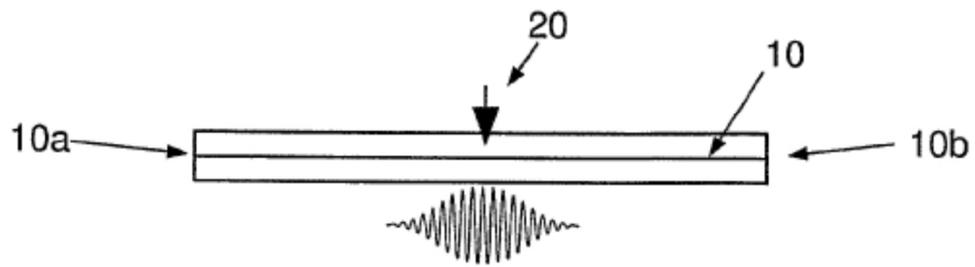


Figura 6

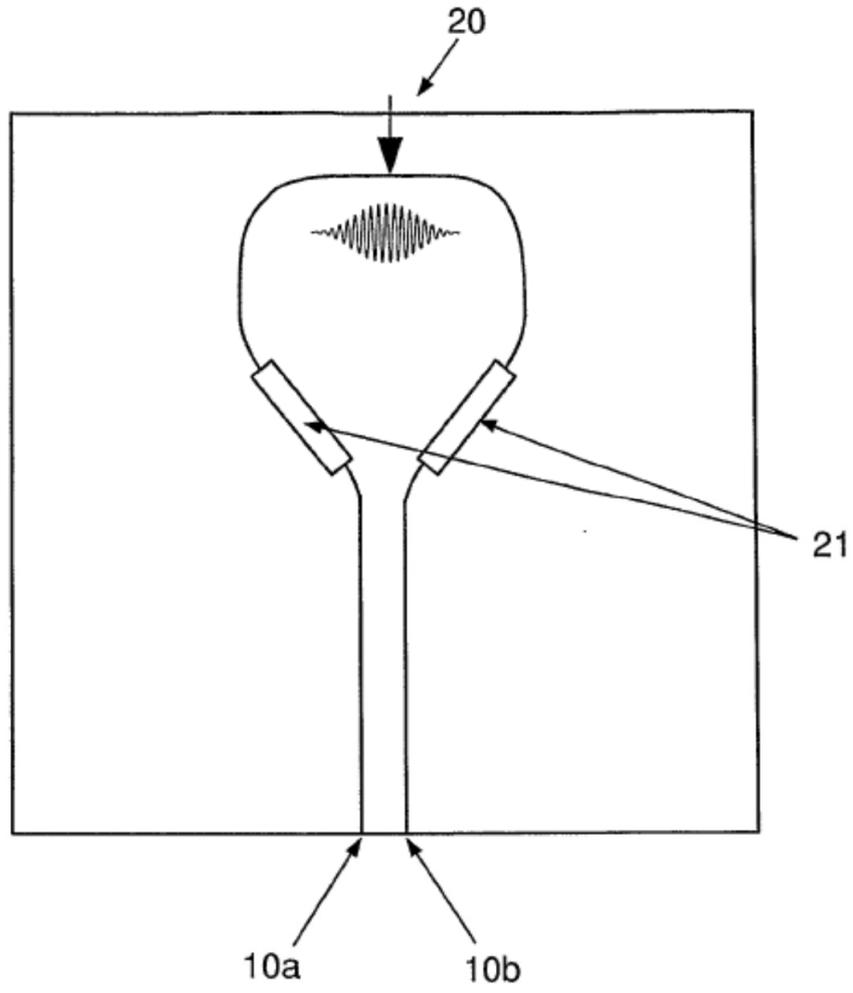


Figura 7

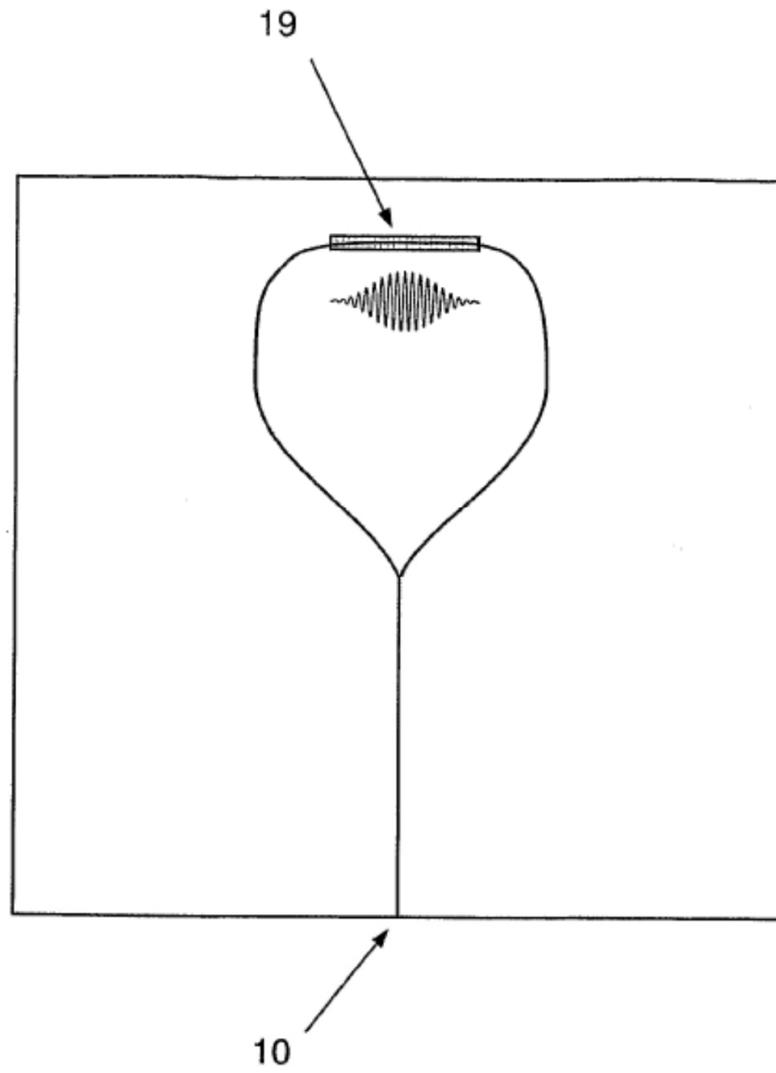


Figura 8

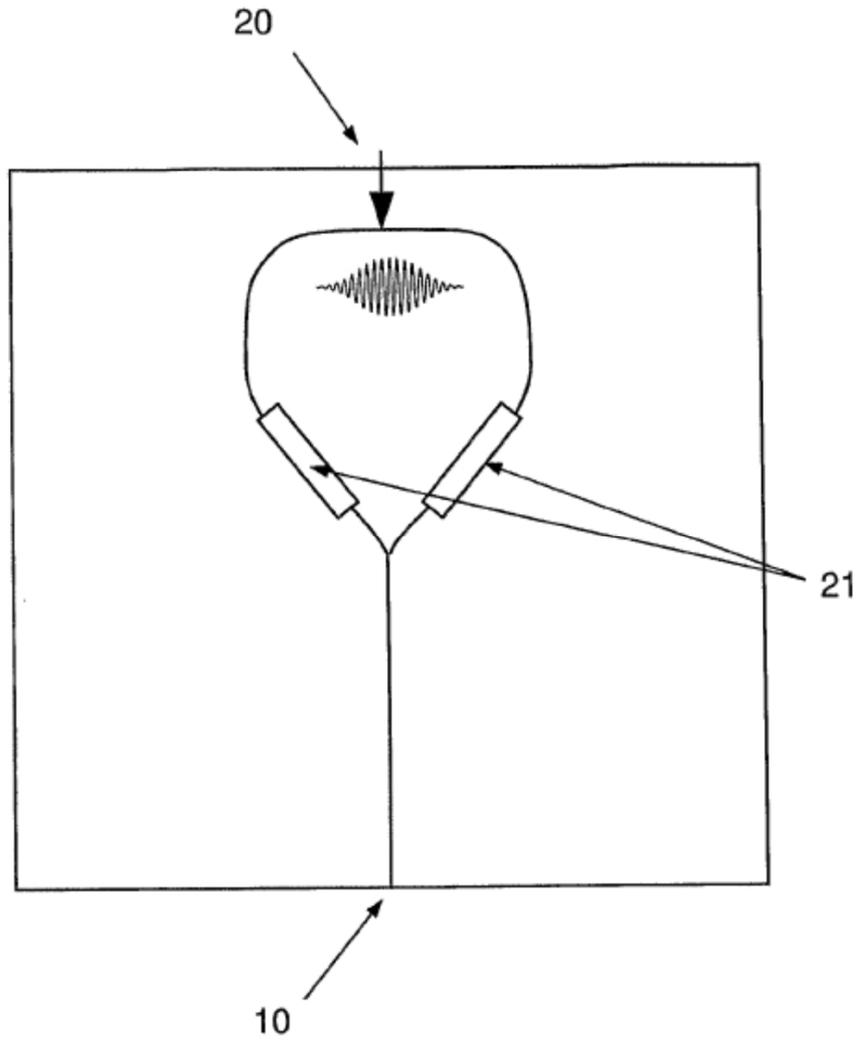


Figura 9