

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 989 688**

51 Int. Cl.:

A61B 5/00	(2006.01)	G01N 21/45	(2006.01)
A61B 5/02	(2006.01)		
A61B 5/1459	(2006.01)		
A61B 8/12	(2006.01)		
A61B 5/0215	(2006.01)		
G01L 11/02	(2006.01)		
G02B 6/02	(2006.01)		
G02B 6/12	(2006.01)		
A61B 8/00	(2006.01)		
G01H 9/00	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.03.2019 PCT/EP2019/055897**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **12.09.2019 WO19170884**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.03.2019 E 19708559 (0)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.05.2024 EP 3761853**

54 Título: **Sensor que comprende una guía de ondas con resonador óptico y procedimiento de detección**

30 Prioridad:

09.03.2018 EP 18160946

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.11.2024

73 Titular/es:

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN (100.0%)
Arcisstr. 21
80333 München, DE**

72 Inventor/es:

**SHNAIDERMAN, RAMI;
WISSMEYER, GEORG MICHAEL y
NTZIACHRISTOS, VASILIS**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 989 688 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 que comprende una guía de ondas con resonador óptico y procedimiento de detección

Campo técnico

- 5 Las realizaciones de la invención se refieren a guías de ondas y resonadores ópticos que pueden utilizarse en sensores, y a sensores y procedimientos de detección que utilizan dichas guías de ondas.

Antecedentes

- 10 Existe una demanda cada vez mayor de guías de ondas y resonadores ópticos que se presten a nuevos campos de aplicación. A modo de ilustración, la detección acústica, por ejemplo, en la gama de frecuencias de los ultrasonidos, se ha realizado con frecuencia mediante el uso de detectores piezoeléctricos. La demanda actual de sensores de ultrasonidos de alto rendimiento no puede satisfacerse con estos detectores piezoeléctricos tradicionales. A modo de ilustración, los ensayos no destructivos en entornos difíciles y los campos emergentes de la endoscopia optoacústica y la microscopía híbrida optoacústica/fotoacústica requieren sensores extremadamente pequeños, flexibles e inmunes a las interferencias electromagnéticas, y que presenten un gran ancho de banda. Esto último es especialmente importante, ya que el ancho de banda y la frecuencia central de las señales ultrasónicas generadas por el efecto optoacústico son proporcionales al tamaño del absorbedor óptico.

- 15 Sería deseable disponer de sensores de gran ancho de banda que después pudieran utilizarse para, por ejemplo, diferenciar y etiquetar los absorbentes en función de su tamaño, tal como la vasculatura bajo y en la piel. Estos sensores mejorados pueden ayudar, por ejemplo, a estudiar y vigilar tumores por medio del estudio de la angiogénesis, y afecciones como la diabetes, la hipertensión, etc.

- 20 Los sensores basados en resonadores ópticos son una alternativa prometedora.

- 25 El documento WO 2010/043876 A2 desvela un sensor combinado de presión y temperatura. El sensor comprende al menos un primer elemento sensor óptico de un primer tipo y al menos un segundo elemento sensor óptico de un segundo tipo. El sensor está adaptado para compensar los efectos de temperatura y/o presión en el primer o segundo elemento sensor óptico mediante el uso de una respuesta del otro de los segundos o primeros elementos sensores ópticos. Se puede formar una cavidad óptica en un hueco entre dos extremos de fibra.

El documento US 7 054 011 B2 desvela un sensor de fibra óptica que tiene un tubo hueco unido a la cara extrema de una fibra óptica, y un diafragma unido al tubo hueco.

- 30 El documento G. Wissmeyer y otros, "All-optical optoacoustic microscope based on wideband pulse interferometry," Optics Letters, Vol. 41, Issue 9, pp. 1953-1956 (2016) desvela un microscopio optoacústico totalmente óptico basado en una rejilla de Bragg de fibra desplazada de π -fase (π -FBG) con interferometría pulsada restaurada de coherencia (CRPI) utilizada como procedimiento de interrogación.

El documento A. Rosenthal et al., "Embedded ultrasound sensor in a silicon-on-insulator photonic platform", Appl. Física. Lett. 104, 021116 (2014) desvela un sensor de ultrasonidos miniaturizado que se basa en una rejilla de Bragg de fibra con desplazamiento de fase π formada por ondulación de guía de ondas.

- 35 El documento A. Rosenthal y otros, "Sensitive interferometric detection of ultrasound for minimally invasive clinical imaging applications", Laser Photonics Rev., Vol. 8, Núm. 3, pp. 450-457 (2014) desvela detectores ópticos miniaturizados.

- 40 El documento C. Zhang et al., "Review of Imprinted Polymer Microrings as Ultrasound Detectors: Design, Fabrication, and Characterization" (Diseño, fabricación y caracterización), IEEE SENSORS JOURNAL, vol. 15, núm. 6 (junio de 2015)) desvela detectores de ultrasonidos adecuados para la obtención de imágenes fotoacústicas.

El documento R. Nuster et al., "Photoacoustic section imaging using an elliptical acoustic mirror and optical detection," JBO Letter, vol. 17(3), 030503 (March 2012) desvela un procedimiento que combina un interferómetro óptico con un espejo acústico.

- 45 El documento US 2002/0166955 A1 describe un aparato receptor de ultrasonidos que incluye un elemento detector de ultrasonidos para modular la luz.

El documento US 7 292 755 B1 desvela una guía de ondas óptica planar que tiene al menos dos reflectores.

El documento US 2014/0180030 A1 desvela un cable de presión y velocidad sanguíneas intravasculares.

Mientras que los sensores divulgados en estos documentos proporcionan varios beneficios sobre los sensores convencionales que se basan, por ejemplo, en detectores piezoeléctricos, sigue existiendo la necesidad de guías de

onda y sensores que permitan realizar la detección con buena sensibilidad, a la vez que ofrezcan una sección transversal pequeña y que, debido a su miniaturización, aumenten el ancho de banda y el ángulo de detección.

Sumario

- Existe una necesidad en la técnica de dispositivos y procedimientos que presenten características mejoradas adecuadas para la detección u otras aplicaciones. En particular, existe la necesidad de dispositivos y procedimientos que se presten a un uso versátil en la detección u otras aplicaciones, al tiempo que ofrecen una alta sensibilidad y tienen pequeñas dimensiones. Hay en particular una necesidad de tales dispositivos y procedimientos que mitigan problemas convencionalmente asociados con interferencia electromagnética. La invención es definida por las reivindicaciones adjuntas 1-15.
- De acuerdo con algunas realizaciones, se proporciona una guía de ondas que tiene un resonador óptico integrado monolíticamente en la guía de ondas. El resonador óptico está definido entre una rejilla de Bragg (BG) por un lado y al menos un reflector por el otro, teniendo el al menos un reflector una configuración diferente a la de la BG. El resonador óptico se coloca en un extremo de la guía de ondas. El reflector puede comprender una capa reflectante recubierta sobre una cara extrema (faceta) de la guía de ondas y/o puede comprender un material susceptible de inducir plasmones superficiales en la faceta de la guía de ondas, tales como nanopartículas, definiendo de este modo una cavidad óptica con un factor Q elevado en un extremo de la guía de ondas. El reflector puede incluir otra rejilla de Bragg más corta situada junto a la cara final de la guía de ondas. La rejilla de Bragg más corta puede interponerse entre una parte interior del resonador óptico y la cara final de la guía de ondas que puede estar recubierta con una capa reflectante. El resonador óptico es asimétrico en el sentido de que está delimitado por la rejilla de Bragg en un lado y el al menos un reflector que tiene una configuración diferente en el otro lado.
- En algunas realizaciones, un resonador óptico tipo Fabry-Perot, es decir, un etalón, puede estar delimitado por la rejilla de Bragg y una capa ópticamente reflectante, siendo la rejilla de Bragg y el resonador parte de la guía de ondas. La capa reflectante puede estar formada en el extremo de una guía de ondas, en su cara final.
- El resonador óptico puede comprender la rejilla de Bragg y el al menos un reflector, con una porción interna del resonador óptico (que puede definirse como la porción del resonador óptico interpuesta entre el extremo de la rejilla de Bragg que está más cerca de la cara extrema de la guía de ondas y la parte del al menos un reflector que está más cerca de la rejilla de Bragg) formada monolíticamente con la guía de ondas.
- Una guía de ondas de este tipo con resonador óptico integrado tiene diversas aplicaciones. Por ejemplo, se pueden detectar las ondas acústicas, tales como los ultrasonidos, que inciden en la faceta, a diferencia de otros sensores basados en resonadores. Cuando la faceta de la guía de ondas, en lugar de la superficie circunferencial exterior, se utiliza para la detección, el tamaño efectivo de detección se reduce drásticamente y el ancho de banda de detección aumenta. La implementación del resonador óptico como parte de la guía de ondas reduce drásticamente las pérdidas y aumenta el confinamiento de la luz, lo que da como resultado un dispositivo sensor compacto. El diseño asimétrico permite la máxima exposición del resonador óptico al estímulo que se desea detectar, así como una lectura óptica del resonador óptico esencialmente libre de pérdidas. La detección realizada por medio de la guía de ondas con resonador óptico integrado es inmune a las interferencias electromagnéticas.
- Un sensor de acuerdo con un aspecto de la divulgación comprende una guía de ondas que tiene un eje longitudinal y una cara extrema, la guía de ondas que comprende una rejilla de Bragg. En la cara extrema de la guía de ondas hay al menos un reflector. Un resonador óptico está formado por la rejilla de Bragg, el al menos un reflector, y una porción interior del resonador óptico que se encuentra entre la rejilla de Bragg y el al menos un reflector. La parte interior del resonador óptico se extiende dentro de una parte de la guía de ondas. El sensor comprende un detector configurado para detectar al menos una característica espectral del resonador óptico o un cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico.
- La al menos una característica espectral o el cambio de al menos una característica espectral puede comprender una cualquiera o una combinación cualquiera de: al menos una frecuencia de resonancia del resonador óptico; un desplazamiento de al menos una frecuencia de resonancia del resonador óptico; una intensidad de luz detectada en respuesta a la luz interrogadora medida mediante el uso de interferometría de onda continua coherente (cw) o interferometría cw incoherente; una respuesta espectral del resonador óptico, que puede detectarse mediante el uso de interrogación de banda ancha; y/o un ancho de banda de al menos un pico de resonancia del resonador óptico.
- El sensor puede ser un sensor acústico, un sensor de presión o un sensor de temperatura.
- El resonador óptico puede configurarse para confinar la radiación electromagnética en proximidad a la cara del extremo, opcionalmente dentro de una porción del extremo de la guía de ondas que se extiende entre 100 nm y 1 cm, preferentemente entre 200 nm y 5 mm, desde la cara del extremo. La porción del extremo entre el extremo de la rejilla de Bragg que da a la cara del extremo y la cara del extremo puede tener preferentemente una longitud de menos de 10 mm, más preferentemente de menos de 1 mm, más preferentemente de menos de 100 μ m, más preferentemente de menos de 1 μ m, más preferentemente de menos de 500 nm.

La longitud de la porción interna del resonador óptico puede medirse mediante el uso de, por ejemplo, microscopía, tal como microscopía de luz blanca, o microscopía electrónica.

5 La longitud de la porción interior del resonador óptico, la longitud de la rejilla de Bragg y/o la longitud total del resonador óptico pueden deducirse mediante el uso de técnicas computacionales. A modo de ilustración, la longitud total del resonador óptico puede determinarse por medio de simulaciones espectrales realizadas por un procedimiento de matriz de transferencia. Las simulaciones del espectro pueden compararse con las características espectrales medidas.

10 El sensor puede comprender además una fuente configurada para suministrar radiación electromagnética al resonador óptico a través de la rejilla de Bragg. El detector puede estar configurado para detectar la radiación electromagnética que pasa desde el resonador óptico a través de la rejilla de Bragg y se propaga a lo largo de la guía de ondas.

El detector puede estar configurado para detectar una respuesta espectral del resonador óptico y/o una intensidad de radiación electromagnética del resonador óptico en función del tiempo.

El detector puede estar configurado para detectar un cambio en la respuesta espectral o un cambio en la intensidad de la luz acoplada fuera del resonador óptico en función del tiempo.

15 El detector puede estar configurado para detectar el cambio en la respuesta espectral o el cambio en la intensidad desencadenado por al menos uno de los siguientes: un cambio en la distancia entre la rejilla de Bragg y el al menos un reflector; un cambio en el índice de refracción en la porción de la guía de ondas; un cambio en la reflectividad de la rejilla de Bragg.

20 El al menos un reflector puede comprender al menos una capa reflectante. La al menos una capa reflectante puede comprender al menos una capa metálica y/o al menos una capa dieléctrica. La al menos una capa reflectante puede recubrirse directamente sobre la cara extrema de la guía de ondas o sobre un soporte distinto de la guía de ondas.

25 El al menos un reflector puede comprender partículas o un material configurado de forma que se generen plasmones de superficie en el mismo para formar el resonador óptico con la rejilla de Bragg. La al menos una característica espectral puede ser al menos una frecuencia de resonancia del resonador óptico que puede desplazarse en respuesta a la interacción de una muestra con los plasmones superficiales de las partículas o el material.

El al menos un reflector puede comprender una superficie funcionalizada o una capa metálica estructurada.

El sensor puede comprender un elemento de acoplamiento acústico fijado a la cara extrema de la guía de ondas. El elemento de acoplamiento acústico puede tener una longitud elegida para que coincida con una frecuencia central de una onda acústica que se va a detectar.

30 El sensor puede comprender además un espejo acústico y un mecanismo de retención para posicionar el resonador óptico en relación con el espejo acústico.

35 El espejo acústico puede comprender una superficie que define al menos una porción de un elipsoide rotacional, en el que un eje mayor del elipsoide rotacional está inclinado con respecto a una superficie de cara plana del espejo acústico, y en el que la superficie que define al menos una porción del elipsoide rotacional está rebajada con respecto a la superficie de cara plana.

El mecanismo de retención puede estar configurado para posicionar la guía de ondas de forma que la guía de ondas se superponga a un punto focal del elipsoide rotacional o esté localizada en proximidad al punto focal del elipsoide rotacional.

El punto focal puede estar situado dentro de una cavidad del espejo acústico.

40 Un conjunto de sensores de acuerdo con una realización comprende una pluralidad de sensores de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes. La pluralidad de sensores puede estar dispuesta en una matriz unidimensional o en una matriz bidimensional.

45 El conjunto de sensores puede utilizarse como un dispositivo o cámara de formación de imágenes acústicas, de presión o de ultrasonidos, respectivamente. Puede realizarse una lectura dividida en el tiempo o simultánea de los distintos sensores. El tamaño del conjunto de sensores o del dispositivo de formación de imágenes puede adaptarse al tamaño de la muestra sobre la que se van a obtener las imágenes.

El dispositivo de formación de imágenes o la cámara pueden ser operativos para detectar ondas acústicas, variaciones de presión o ultrasonidos de forma espacialmente resuelta.

50 Un procedimiento de detección de acuerdo con un aspecto de la divulgación comprende posicionar un sensor en relación con una muestra. El sensor comprende una guía de ondas que tiene un eje longitudinal y una cara extrema, la guía de ondas comprende una rejilla de Bragg, al menos un reflector en la cara extrema de la guía de ondas, y un resonador óptico formado por la rejilla de Bragg, el al menos un reflector y una parte interior del resonador óptico

situada entre la rejilla de Bragg y el al menos un reflector. La parte interior del resonador óptico se extiende dentro de una parte de la guía de ondas. El procedimiento comprende detectar al menos una característica espectral del resonador óptico o un cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico.

- La detección de al menos una característica espectral del resonador óptico o el cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico puede utilizarse para realizar al menos uno de los siguientes procedimientos: detección acústica; detección médica; biosensores; detección de temperatura; imágenes de diferenciación de frecuencia; imágenes de proyección; imágenes optoacústicas; ensayos optoacústicos no destructivos; detección química; detección plasmónica.

El sensor puede ser el sensor de cualquiera de las realizaciones aquí descritas.

- Se proporciona una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con otro aspecto de la invención. La guía de ondas tiene un eje longitudinal y una cara extrema. La guía de ondas con resonador óptico integrado comprende una rejilla de Bragg en la guía de ondas y al menos un reflector en la cara extrema de la guía de ondas, en la que una porción interior del resonador óptico entre la rejilla de Bragg y el al menos un reflector se extiende dentro de una porción de la guía de ondas.
- Un sensor de acuerdo con otro aspecto de la divulgación comprende un transductor acústico, un espejo acústico y un mecanismo de retención para posicionar el transductor acústico en relación con el espejo acústico.

- Los dispositivos, procedimientos y conjuntos de acuerdo con las realizaciones consiguen varios efectos. A modo de ilustración, los sensores y guías de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con las realizaciones son capaces de detectar ondas acústicas, otras variaciones de presión, temperatura u otros estímulos mediante el uso de la cara extrema, es decir, la faceta de la guía de ondas, que tiene unas dimensiones características mucho menores que la longitud de la guía de ondas. Esto proporciona un gran ancho de banda y/o permite combinar fácilmente varios sensores en una matriz unidimensional o bidimensional. Cuando se proporciona un reflector en una cara extrema de la guía de ondas, puede formarse un resonador óptico de alto Q adyacente al extremo de la fibra. La lectura puede realizarse en un modo en el que tanto la luz incidente acoplada en el resonador óptico como la luz saliente acoplada fuera del resonador óptico viajan a lo largo del mismo camino de la guía de ondas en direcciones opuestas.

- Los dispositivos, procedimientos y conjuntos de acuerdo con las realizaciones pueden utilizarse para detectar ondas acústicas, otras variaciones de presión, temperatura u otros estímulos, sin estar limitados a ello. Los dispositivos, procedimientos y conjuntos de acuerdo con las realizaciones pueden utilizarse para la detección acústica, la detección médica, la biodetección, la detección de temperatura, la obtención de imágenes por diferenciación de frecuencias, la obtención de imágenes por proyección, la obtención de imágenes optoacústicas, los ensayos optoacústicos no destructivos, la detección química o la detección plasmónica, sin estar limitados a ello.

La invención se expone en las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

- Las realizaciones de la divulgación se describirán con referencia a los dibujos, en los que signos de referencia idénticos o similares designan elementos idénticos o similares.

- La Fig. 1 es una vista esquemática de un sensor de acuerdo con una realización.
- La Fig. 2 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 3 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 4 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 5 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 6 es una vista esquemática en perspectiva de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 7 es una vista en planta de una cara extrema de la guía de ondas con resonador óptico integrado de la Fig. 6, en una dirección de visión a lo largo de una dirección longitudinal de la guía de ondas.
- La Fig. 8 es una vista esquemática en perspectiva de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.
- La Fig. 9 es una vista en planta de una cara extrema de la guía de ondas con resonador óptico integrado de la Fig. 8, en una dirección de visión a lo largo de una dirección longitudinal de la guía de ondas.
- La Fig. 10 es un gráfico que representa una respuesta en frecuencia de una guía de ondas con resonador óptico integrado a una fuente acústica puntual en función de la frecuencia acústica.
- La Fig. 11 es un gráfico que representa un espectro de resonancia de un resonador óptico de acuerdo con una realización, mostrado con inversión espectral.
- La Fig. 12 es una vista esquemática de un sensor de acuerdo con una realización.

La Fig. 13 es una vista esquemática que ilustra un uso ejemplar del sensor de la Fig. 12.

La Fig. 14 es una vista esquemática de un sensor de acuerdo con una realización.

La Fig. 15 es un diagrama de flujo de un procedimiento de acuerdo con una realización.

La Fig. 16 es una vista esquemática de un conjunto de sensores de acuerdo con una realización.

La Fig. 17 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.

Descripción detallada de las realizaciones

Las realizaciones ejemplares se describirán con referencia a los dibujos en los que signos de referencia idénticos o similares designan elementos idénticos o similares. Aunque algunas realizaciones se describirán en el contexto de campos de uso ejemplares, tal como la detección de ondas acústicas, en particular ultrasonidos, y construcciones ejemplares, tal como fibras ópticas y circuitos integrados fotónicos construidos por medio de una técnica de silicio sobre aislante, las realizaciones no se limitan a ello. Las características de las realizaciones pueden combinarse entre sí, a menos que se indique específicamente lo contrario.

En la presente memoria descriptiva se utiliza el término "optoacústico", entendiéndose que "fotoacústico" es otro término sinónimo utilizado convencionalmente en la técnica.

Tal como se utilizan en la presente memoria descriptiva, los sensores y guías de ondas que responden a "ondas acústicas" pueden, en particular, responder a ondas ultrasónicas.

La Fig. 1 muestra un sensor 10 de acuerdo con una realización. El sensor 10 comprende una guía de ondas 20. La guía de ondas 20 puede ser una guía de ondas monomodo, una guía de ondas multimodo, una guía de ondas que mantiene la polarización, una guía de ondas que no mantiene la polarización, una guía de ondas de modo compuesto, una fibra de cristal fotónico, una fibra óptica o una guía de ondas de silicio, sin estar limitada a ello.

La guía de ondas 20 se extiende a lo largo de un eje longitudinal entre un primer extremo, en el que la guía de ondas 20 tiene una cara extrema 21, y un segundo extremo 22. Tal como se utiliza en la presente memoria descriptiva, el término "cara extrema" se refiere a una faceta o cara de la guía de ondas que se extiende transversalmente al eje longitudinal de la guía de ondas 20, y que en particular puede extenderse perpendicularmente al eje longitudinal de la guía de ondas 20.

El recuadro de la Fig. 1 muestra esquemáticamente una porción final de la guía de ondas 20. La guía de ondas 20 tiene una rejilla de Bragg (BG) 23. La rejilla de Bragg 23 está formada en la guía de ondas 20. La rejilla de Bragg 23 está situada cerca de la cara extrema 21 de la guía de ondas 20, pero separada de ella. En la cara extrema 21 hay al menos un reflector 24. El al menos un reflector puede ser, o puede comprender, una capa reflectante recubierta sobre la cara extrema 21. El al menos un reflector puede ser, o puede comprender, un material o estructura proporcionado en la cara extrema 21 que crea plasmones de superficie y define una resonancia óptica entre el al menos un reflector y la rejilla de Bragg 23.

Como se usa aquí, el término "reflector" se refiere generalmente a un material o estructura que es capaz de reflejar la luz que incide sobre él desde la rejilla de Bragg 23 de vuelta hacia la rejilla de Bragg 23. El reflector es de construcción diferente a la rejilla de Bragg 23.

Tal como se utiliza en la presente memoria descriptiva, un "reflector en la cara extrema de la guía de ondas" abarca los reflectores que están dispuestos externamente de la guía de ondas, por ejemplo, en contacto directo con la cara extrema, sin limitarse a ello. A modo de ilustración, el al menos un reflector puede incluir opcionalmente elementos reflectantes que están formados integralmente con la guía de ondas y colocados dentro de la guía de ondas.

Un resonador óptico 25 comprende el al menos un reflector 24, la rejilla de Bragg 23, y una porción interna del resonador óptico 25 que está situada entre el al menos un reflector 24 y la rejilla de Bragg 23. Un haz de luz que entra en el resonador óptico es confinado y se reflejará repetidamente en el al menos un reflector 24 y en la rejilla de Bragg 23. Esto hace que el haz de luz interfiera consigo mismo dentro del resonador óptico 25. Dicho resonador óptico 25 tiene una respuesta espectral característica que incluye una o múltiples resonancias.

El sensor 10 comprende un detector 32 acoplado al segundo extremo 22 de la fibra óptica por medio de una disposición de acoplamiento 31 adecuada. El detector 32 puede comprender un filtro óptico y un demodulador, por ejemplo.

El sensor 10 puede comprender una fuente 33 de radiación electromagnética, que puede ser un láser u otra fuente de luz adecuada para generar radiación electromagnética. La radiación electromagnética puede ser luz. La luz puede tener una longitud de onda en al menos uno o varios de los rangos espectrales visible, el infrarrojo (IR) y el ultravioleta (UV). La radiación electromagnética generada por la fuente 33 puede acoplarse a la fibra a través de la disposición de acoplamiento 31. La disposición de acoplamiento 31 puede incluir un acoplador 50/50, por ejemplo.

La fuente 33 de radiación electromagnética puede acoplarse a la guía de ondas 20 a través de otra guía de ondas (no mostrada). La guía de ondas adicional puede ser diferente de la guía de ondas 20 en cuanto a su construcción. A modo de ilustración, la guía de ondas 20 puede ser una guía de ondas de plataforma de silicio sobre aislante (SOI), y

la guía de ondas adicional que acopla la fuente 33 a la guía de ondas 20 puede ser una fibra óptica que está conectada a la guía de ondas 20.

5 La radiación electromagnética, en particular la luz 41 (que sirve como luz interrogadora para interrogar al resonador óptico), emitida por la fuente 33 viajará a lo largo de la guía de ondas 20 a través de la rejilla de Bragg 23 y hacia la porción interior del resonador óptico 25. La luz puede ser reflejada múltiples veces por la rejilla de Bragg 23 y el reflector 24 antes de ser acoplada fuera del resonador óptico 25 a través de la rejilla de Bragg 23, de vuelta hacia el segundo extremo 22 de la guía de ondas 20. La luz 42 se escapará automáticamente del resonador óptico 25, debido a que la rejilla de Bragg 23 tiene una reflectividad inferior al 100%.

10 El detector 32 puede detectar una o varias frecuencias de resonancia u otras características espectrales o cambios de características espectrales del resonador óptico 25 basándose en la luz acoplada fuera del resonador óptico 25. La detección de una intensidad que es indicativa de un desplazamiento de una o varias frecuencias de resonancia puede realizarse mediante el uso de, por ejemplo, las técnicas desveladas en el documento A. Rosenthal et al., Opt. Express Vol. 20, Issue 28, pp. 19016-19029 (2012). Alternativa o adicionalmente a la detección de características espectrales por medio de la detección de una intensidad indicativa de una o varias frecuencias de resonancia del resonador óptico 15 25 o un desplazamiento de una o varias frecuencias de resonancia, pueden detectarse otras características de la respuesta espectral del resonador óptico 25. Por ejemplo, puede detectarse un cambio en la intensidad de la luz 42 detectada a una frecuencia fija (por ejemplo, la frecuencia de resonancia del resonador óptico cuando el resonador óptico 25 no está expuesto a ondas acústicas).

20 Puede realizarse interferometría de onda continua (cw) coherente, en la que la intensidad de la luz interrogadora se divide y se hace interferir con la luz acoplada fuera del resonador óptico 25, o interferometría cw incoherente.

El detector 32 puede estar configurado para detectar secuencialmente en el tiempo una o varias frecuencias de resonancia del resonador óptico 25 y/u otras características espectrales del resonador óptico 25 o cambios en las mismas. A modo de ilustración, pueden detectarse variaciones dependientes del tiempo en una frecuencia de resonancia y/o en otras características espectrales del resonador óptico 25.

25 Un dispositivo informático 34 puede utilizar las variaciones dependientes del tiempo en una frecuencia de resonancia y/o en otras características espectrales del resonador óptico 25 para determinar, por ejemplo, una variación de presión dependiente del tiempo, una variación de temperatura dependiente del tiempo, una frecuencia y/o una intensidad de una onda acústica que incide en el resonador óptico 25, u otras cantidades.

30 En una realización ejemplar, la característica espectral del resonador óptico o los cambios en la característica espectral pueden ser la intensidad medida detectada en el detector 32 cuando se realiza una interferometría de onda continua (cw). En este caso, la fuente 33 puede ser un láser cw. La disposición de acoplamiento 31 puede ser un acoplador circulator/50-50. El detector 32 puede comprender un fotodiodo. La interferencia entre una porción de luz ramificada desde la salida de la fuente 33 puede hacerse que interfiera con la luz que se escapa del resonador óptico a través de la rejilla de Bragg 23, y la intensidad resultante puede ser detectada por el fotodiodo. La lectura del fotodiodo puede 35 realizarse por medio de un sistema de adquisición de datos de un ordenador 34, pero también puede implementarse de otras formas sin necesidad de utilizar un ordenador. El láser cw puede controlarse por medio de un ordenador, pero también por medio de otros mecanismos.

La interferometría cw puede implementarse como interferometría cw coherente o como interferometría cw incoherente.

40 En interferometría cw coherente, el láser cw se sintoniza a una frecuencia de resonancia del resonador óptico o a un valor dentro del ancho completo-medio-máximo (FWHM) de la frecuencia de resonancia. Una perturbación en el resonador, que puede estar causada por ultrasonidos o por un cambio de temperatura, desplaza la condición de resonancia del resonador. De este modo, puede detectarse un cambio de intensidad en el fotodiodo de lectura.

45 En interferometría cw incoherente, una fuente de luz de banda ancha 31 interroga al resonador y asume la forma espectral del resonador. Las perturbaciones o los cambios de temperatura desplazarán la condición de resonancia y los desplazamientos resultantes en la longitud de onda media de esta forma espectral pueden entonces monitorizarse (es decir, demodularse) con al menos uno de un medidor de longitud de onda, un espectrómetro o un interferómetro Mach-Zehnder. Para interrogar o leer el resonador óptico 25 puede emplearse la interferometría pulsada de banda ancha de fuentes de luz de banda ancha en combinación con espectrómetros o medidores de longitud de onda.

50 El resonador óptico 25 puede configurarse para confinar la luz dentro de una porción de la guía de ondas que se extiende a lo largo de una longitud desde la cara extrema 21, siendo la longitud de 100 nm a 1 cm, preferentemente de 200 nm a 5 mm. Una porción de extremo entre el extremo de la rejilla de Bragg 23 que da a la cara de extremo 21 y la cara de extremo 21 puede tener preferentemente una longitud de menos de 10 mm, más preferentemente de menos de 1 mm, más preferentemente de menos de 100 μ m, más preferentemente de menos de 1 μ m, más preferentemente de menos de 500 nm.

55 La rejilla de Bragg 23 puede tener una reflectividad que puede ser preferentemente de al menos 90%, aún más preferentemente de al menos 95%, aún más preferentemente de al menos 97%. El al menos un reflector 24 puede tener una reflectividad que puede ser preferentemente de al menos el 90%, aún más preferentemente de al menos el

95%, aún más preferentemente de al menos el 96%, aún más preferentemente de al menos el 98%, aún más preferentemente de al menos el 99%.

Las Figs. 2 a 5 muestran respectivamente diversas variantes de la guía de ondas 20 que pueden utilizarse en el sensor 10.

5 La Fig. 2 es una vista esquemática de una guía de ondas 20 que comprende una rejilla de Bragg 23 y al menos un reflector 24 en una cara extrema 21 de la guía de ondas 20. Un resonador óptico 25 está formado por la rejilla de Bragg 23, el al menos un reflector 24, y una porción interna del resonador óptico 25 que se extiende entre la rejilla de Bragg 23 y el al menos un reflector 24. La parte interior del resonador óptico 25 está integrada en la guía de ondas 20. El al menos un reflector 24 puede ser un revestimiento reflectante, por ejemplo. La parte interior del resonador óptico 10 25 puede tener una longitud L_C 35 definida entre la cara extrema 21 de la guía de ondas 20 y el extremo de la rejilla de Bragg 23 más cercano a la cara extrema 21. La porción interior del resonador óptico 25, que se interpone entre el extremo de la rejilla de Bragg 23 más próximo a la cara extrema 21 y la superficie del reflector o reflectores 24 más próximos a la rejilla de Bragg 23, puede tener una longitud L_C 35 más corta o más larga que una longitud de la rejilla de Bragg 23. Esta porción interna del resonador óptico 25, situada entre la rejilla de Bragg y el reflector o reflectores 15 24 que están dispuestos adyacentes a la cara extrema 21, también se denomina aquí porción interna del resonador óptico. Mientras que la parte interior del resonador óptico 25 es similar en función a la cavidad definida entre dos espejos en un resonador Fabry-Perot convencional, en las realizaciones de la divulgación la parte interior del resonador óptico 25 es una parte de la guía de ondas 20 que se encuentra en proximidad a la cara extrema 21.

El resonador óptico 25 tiene una construcción asimétrica, estando delimitado por diferentes elementos reflectantes 23, 24 en lados opuestos. El resonador óptico 25 está situado cerca de un primer extremo de la guía de ondas 20. Una porción larga 26 de la guía de ondas 20 está conectada al resonador óptico 25 únicamente a través de la rejilla de Bragg 23, mientras que ninguna porción de la guía de ondas 20 se extiende desde el lado opuesto del resonador óptico 25 más allá de la cara extrema 21.

La guía de ondas 20 puede ser una guía de ondas óptica. En este caso, el resonador óptico 25 forma parte de la guía de ondas óptica 20 y está situado cerca del extremo físico de la guía de ondas 20. El resonador óptico 25 está delimitado en un lado por la rejilla de Bragg 23 y, en la realización de la Fig. 2, en el otro lado por una capa reflectante en la cara extrema 21 de la guía de ondas 20. La luz 41 es guiada hacia el resonador óptico 25 desde la porción 26 de la guía de ondas a través de la rejilla de Bragg 23. El resonador óptico 25 está realizado monolíticamente dentro de la guía de ondas 20. La lectura óptica del resonador óptico 25 puede realizarse sin pérdidas a través de la rejilla de Bragg 23. Este principio aprovecha el elevado confinamiento espacial de la luz que permite la rejilla de Bragg 23, y da lugar a un resonador óptico 25 compacto y sensible en la punta de la guía de ondas 20. Junto con un factor Q elevado, puede alcanzarse una alta sensibilidad en aplicaciones de detección.

Cualquier cambio físico en el resonador óptico 25, tal como la compresión del resonador óptico 25, cambios inducidos por la presión o la temperatura en la periodicidad de la rejilla de Bragg 23 y/o de la capa de revestimiento reflectante 24 dará lugar a variaciones del espectro reflejado y puede ser monitorizado.

La naturaleza puramente óptica del sensor que incluye la guía de ondas 20 con resonador óptico 25 integrado lo hace inmune a las interferencias electromagnéticas. Si se realiza en una guía de ondas de baja pérdida, por ejemplo, una fibra monomodo utilizada para telecomunicaciones en redes ópticas, el resonador óptico 25 puede colocarse a muchos kilómetros de distancia de su configuración de lectura, por ejemplo, el detector 32, sin obstaculizar su rendimiento.

40 La Fig. 3 es una vista esquemática de una guía de ondas 20 que comprende una rejilla de Bragg 23 y al menos un reflector 24 en una cara extrema 21 de la guía de ondas 20. Un resonador óptico 25 está formado por la rejilla de Bragg 23, el al menos un reflector 24, 27, y una porción interior del resonador óptico 25 que se extiende entre la rejilla de Bragg 23 y el al menos un reflector 24. La parte interior del resonador óptico 25 está integrada en la guía de ondas 20. Uno o varios elementos ópticos 27 se interponen entre la porción interior del resonador óptico 25 y la capa reflectante 24 de la cara extrema 21. El uno o varios elementos ópticos 27 pueden estar formados integralmente con la guía de ondas 20. El uno o varios elementos ópticos 27 pueden incluir regiones alternas de diferente índice de refracción. El uno o varios elementos ópticos 27 pueden incluir otra rejilla de Bragg mucho más corta que la rejilla de Bragg 23. El uno o varios elementos ópticos 27 pueden ser elementos reflectantes que ayudan a mantener la luz dentro de la porción interior del resonador óptico 25, ayudando al funcionamiento de la capa reflectante 24. El al menos un reflector puede comprender la rejilla de Bragg adicional u otros elementos reflectantes 27, dispuestos adyacentes a la cara extrema de la guía de ondas en el interior de la guía de ondas.

La porción interior del resonador óptico 25 puede tener una longitud L_C 35 que es más corta o más larga que una longitud de la rejilla de Bragg 23. Uno o varios elementos ópticos 27 pueden extenderse a lo largo de una distancia L_R 37 desde la cara extrema 21 hacia el interior de la guía de ondas 20. La longitud L_C 35 de la porción interior del resonador óptico 25 puede definirse entre uno de los elementos ópticos 27 que mira hacia la rejilla de Bragg 23 y el extremo de la rejilla de Bragg 23 que mira hacia los elementos ópticos 27.

La Fig. 4 es una vista esquemática que ilustra la guía de ondas 20 con resonador óptico 25 integrado en un caso de uso ejemplar. El resonador óptico 25 está situado cerca de una fuente acústica 43 que puede emitir ondas acústicas

44. Las ondas acústicas 44 pueden ser ondas ultrasónicas. El impacto sobre el resonador óptico 25 hace que éste se comprima y/o provoca cambios inducidos por la presión en la periodicidad de la rejilla de Bragg 23 y/o de la capa de revestimiento reflectante 24. Las variaciones resultantes del espectro reflejado, es decir, de las frecuencias de resonancia detectadas en la luz de retorno 42, pueden controlarse.

5 La Fig. 5 es una vista esquemática de una guía de ondas 20 que comprende una rejilla de Bragg 23. Las nanopartículas metálicas 28 o cualquier otro material o estructura capaz de excitar el plasmón de superficie están provistas en la cara extrema 21. Un resonador óptico 25 comprende la rejilla de Bragg 23, las nanopartículas metálicas 28, y una porción interior del resonador óptico entre la rejilla de Bragg 23 y las nanopartículas metálicas. La parte interior del resonador óptico está integrada en la guía de ondas 20. Los plasmones superficiales se crean en las nanopartículas metálicas 28 u otro material o estructura capaz de excitar plasmones superficiales, para proporcionar una resonancia óptica entre ellos y la rejilla de Bragg 23. El resonador óptico 25 ilustrado en la Fig. 5 puede ser particularmente adecuado para su uso como biosensor o como sensor químico.

15 Se apreciará que el reflector 28 puede permitir que se genere un campo electromagnético más allá de la cara extrema 21 de la guía de ondas 20. La luz en el resonador óptico 25 puede crear plasmones de superficie en las nanopartículas 28 de la cara extrema 21. A su vez, el campo electromagnético de los plasmones superficiales puede extenderse a un espécimen, tal como una muestra biológica. Para una buena precisión de detección, es deseable atrapar la luz muy cerca de la cara extrema 21, tal como a menos de 500 nm, preferentemente a menos de 200 nm, más preferentemente a unos 100 nm o menos de la cara extrema 21 en el resonador óptico. Una porción de extremo entre el extremo de la rejilla de Bragg 23 que mira hacia la cara extrema 21 y la cara extrema 21 puede tener preferentemente una longitud de menos de 10 mm, más preferentemente de menos de 1 mm, más preferentemente de menos de 100 μ m, más preferentemente de menos de 1 μ m, más preferentemente de menos de 500 nm. Esto permite realizar la detección en estructuras y/o características que no emiten estímulos que incidan físicamente en el resonador óptico 25. Por ejemplo, las estructuras y/o características localizadas dentro del tejido a una profundidad pueden ser detectadas mediante el uso de la guía de ondas 20.

25 Cuando los plasmones superficiales interactúan con un espécimen, tal como un espécimen biológico o un espécimen de prueba para ensayos no destructivos, la frecuencia o frecuencias de resonancia del resonador óptico 25 se desplazan.

30 En cualquiera de las realizaciones, la guía de ondas óptica 20 puede ser monomodo (SM) o multimodo, con mantenimiento de polarización (PM) o sin PM y puede fabricarse a partir de una amplia gama de materiales, tal como polímeros, silicio y sílice. La geometría de la guía de ondas 20 también puede variar. La guía de ondas 20 puede tener varias secciones transversales, incluyendo geometrías rectangulares, elipsoidales y circulares.

La capa reflectante 24, 28 puede realizarse en un número de maneras diferentes, incluyendo capas reflectantes metálicas o dieléctricas 24. Pueden aplicarse, por ejemplo, por deposición, por pegado a través de una capa intermedia, por dopaje de la guía de ondas o por crecimiento de estructuras cristalinas.

35 La rejilla de Bragg 23 puede fabricarse por medio de inscripción UV, procedimientos de interferencia láser, o por cualquier otro medio tal como el apilamiento de placas dieléctricas. El perfil de índice de la rejilla de Bragg 23 puede tener diversas formas, tal como rectangular, sinusoidal, apodizado, superestructurado o una combinación de las anteriores. También pueden variar otros parámetros, tales como la periodicidad, el ciclo de trabajo y el coeficiente de acoplamiento. La periodicidad de la rejilla de Bragg 23 puede ajustarse a la longitud de la porción interior del resonador óptico 25 para garantizar que la rejilla de Bragg 23 presenta una alta reflectividad a una longitud de onda que se elige de forma que la luz que tiene esta longitud de onda adquiere un desplazamiento de fase que es aproximadamente π o aproximadamente un múltiplo entero de π a un paso a través de la longitud de la porción interior de la cavidad óptica (es decir, desde que sale de la rejilla de Bragg 23 hasta que incide en el al menos un reflector 24, 28) y/o de forma que un desplazamiento de fase total de ida y vuelta en la porción interior del resonador óptico (es decir, desde que sale de la rejilla de Bragg 23 hasta que incide de nuevo en la rejilla de Bragg 23) es aproximadamente π o aproximadamente un múltiplo entero impar de π (es decir, π , 3π , 5π , 7π , etc.).

40 En las guías de onda con resonador óptico integrado explicadas anteriormente, el resonador óptico 25 puede ser, en particular, un resonador Fabry-Perot (o etalón) fabricado dentro de una guía de onda óptica 20, que está confinado por una capa reflectante 24 en un lado y una rejilla de Bragg 34 en el otro. La lectura del resonador óptico 25 se realiza a través de la rejilla de Bragg 23 prácticamente sin pérdidas.

50 En las guías de onda con resonador óptico integrado, el resonador óptico 25 tiene una longitud de detección menor que la longitud total del resonador óptico.

Un detector o longitud de detección puede ser la suma de una longitud del reflector en la faceta del extremo y una longitud dentro de la guía de onda óptica que incluye la porción interior del resonador óptico. La longitud dentro de la guía de onda óptica que incluye la porción interior del resonador óptico puede exceder la longitud L_C 35 de la porción interior del resonador óptico.

La longitud total del resonador óptico puede incluir además la longitud total de la rejilla de Bragg que delimita el resonador óptico dentro de la guía de ondas.

La longitud de detección puede ser menor que la longitud total del resonador óptico. Esto permite desacoplar la longitud de detección de la respectiva longitud de onda acústica de las señales acústicas (por ejemplo, ultrasónicas) medidas, proporcionando un amplio ancho de banda/respuesta en frecuencia hacia las señales acústicas.

- Los valores numéricos específicos para la longitud de detección y/o la longitud total del detector pueden depender de la implementación de la guía de ondas y el resonador óptico (por ejemplo, fibra óptica o tecnología de silicio sobre aislante). Los valores numéricos específicos de la longitud de detección y/o de la longitud total del detector pueden depender de la aplicación de detección para la que se haya diseñado el sensor. Por ejemplo, la longitud de detección puede ser no superior a 100 μm , no superior a 50 μm , no superior a 10 μm o no superior a 1 μm . La longitud total del detector puede ser mayor, por ejemplo, no más de 1 cm, no más de 0,5 cm, no más de 0,1 cm o no más de 200 μm .
- La guía de ondas puede ser una fibra óptica. En este caso, la longitud de detección puede ser inferior o igual a 100 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 1 cm; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 50 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 0,5 cm; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 10 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 0,1 cm.
- La guía de ondas puede ser una guía de ondas polimérica. En este caso, la longitud de detección puede ser inferior o igual a 100 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 1 cm; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 50 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 0,5 cm; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 10 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 0,1 cm.
- La guía de ondas puede ser una guía de ondas de silicio sobre aislante (Sol). En este caso, la longitud de detección puede ser inferior o igual a 1 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 1 mm; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 10 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 200 μm ; o la longitud de detección puede ser inferior o igual a 1 μm y la longitud total del detector puede ser inferior o igual a 200 μm .
- Aunque las guías de onda con resonador óptico integrado se han explicado anteriormente en el contexto de las aplicaciones de detección, las guías de onda con resonador óptico integrado pueden utilizarse en una amplia variedad de otras aplicaciones en las que se desea el confinamiento de la luz cerca de la punta de una guía de onda. A modo de ilustración, las guías de ondas con resonador óptico integrado pueden utilizarse en aplicaciones en las que no se interroga con la luz 41.
- Las Figs. 6 a 9 son vistas esquemáticas de guías de onda con resonador óptico integrado que han sido fabricadas y con las que se han realizado un número de experimentos.
- La Fig. 6 es una vista esquemática en perspectiva de una guía de ondas 50 con un resonador óptico 55 integrado. La Fig. 7 es una vista en planta de una cara extrema 51 de la guía de ondas 50.
- La guía de ondas 50 es una fibra óptica que tiene un núcleo de fibra 59 y un revestimiento de fibra 58. La fibra óptica se extiende a lo largo de un eje longitudinal y tiene una cara extrema 51, también denominada faceta, que puede extenderse transversalmente, y en particular perpendicularmente, al eje longitudinal. Se aplica una capa ópticamente reflectante 54 sobre la cara extrema 51, por ejemplo, por medio de revestimiento o mediante el uso de cualquiera de las técnicas descritas anteriormente.
- En el núcleo 59 se forma una rejilla de Bragg de fibra 53. Para formar la rejilla de Bragg de fibra 53 puede utilizarse cualquiera de las técnicas descritas anteriormente.
- Además de la capa reflectante 54, pueden proporcionarse opcionalmente elementos ópticos adicionales 57. Los elementos ópticos adicionales 57 pueden disponerse en la guía de ondas 50, de forma que se interpongan entre la parte interior del resonador óptico 55 y la capa ópticamente reflectante 54. Los elementos ópticos adicionales 57 pueden ser elementos reflectantes, tal como una rejilla de Bragg de fibra adicional más corta que la rejilla de Bragg de fibra 53. El al menos un reflector dispuesto en la cara extrema puede incluir la capa ópticamente reflectante 54 y, opcionalmente, la rejilla de Bragg de fibra adicional.
- La rejilla de Bragg de fibra 53 tiene una longitud L_B 63 a lo largo del eje longitudinal de la guía de ondas 50. La parte interior del resonador óptico 55 tiene una longitud L_C 65 a lo largo del eje longitudinal de la guía de ondas 50. Los elementos ópticos reflectantes 57 tienen una longitud L_R 67 a lo largo del eje longitudinal. La rejilla de Bragg de la fibra 53 comienza a una distancia L_G 66 igual a $L_R + L_C$ de la cara extrema 51.
- Se han realizado experimentos para una guía de ondas 50 que es una fibra 1550 monomodo (SM) con mantenimiento de polarización (PM). En la guía de ondas utilizada para los experimentos, el núcleo de fibra 59 tiene un diámetro 69 de 10 μm , y el revestimiento de fibra 58 tiene un diámetro 68 de 125 μm . En la guía de ondas utilizada para los experimentos, la rejilla de Bragg 63 tiene una longitud L_B de 2 mm, inscrita con un periodo P de 300 nm en el núcleo de la fibra por medio de inscripción UV. En la guía de ondas utilizada para los experimentos, la parte interior del resonador óptico 55 tiene una longitud L_C . En el lado opuesto, otra rejilla de Bragg 57 que tiene una longitud L_R 67 de aproximadamente 10 μm está inscrita con un periodo de 300 nm en el núcleo de la fibra por medio de inscripción UV. La capa reflectante 54 es un revestimiento reflectante metálico (Ti (5 nm) y Au (100 nm)) que se deposita en la cara

extrema 54 de la fibra por medio de deposición por pulverización catódica. La rejilla de Bragg adicional 57 puede ayudar en la reflexión y puede ser un reflector dispuesto dentro de la guía de ondas que apoya la función de la capa reflectante 54 para confinar la luz.

5 La longitud L_C puede ajustarse de forma que la luz de interrogación acoplada en el resonador óptico adquiera un desplazamiento de fase que sea aproximadamente π o un múltiplo entero de π al pasar a través de la longitud L_C (es decir, al cubrir la distancia desde que sale de la rejilla de Bragg 53 hasta que incide en el elemento óptico reflectante 54, 57 que está dispuesto más cerca de la rejilla de Bragg) y/o un desplazamiento de fase total de ida y vuelta en la porción interior del resonador óptico es aproximadamente π o un múltiplo entero impar de π (es decir, aproximadamente π , 3π , 5π , 7π , etc.).

10 El resonador óptico 55 integrado en la fibra óptica se probó para detectar señales ultrasónicas 52 generadas a partir de una fuente puntual optoacústica de banda ancha (capa de Au de 200 nm iluminada por láser pulsado de 523 nm (longitud de pulso 1 ns) enfocado en un punto de $\sim 3 \mu\text{m}$).

15 La Fig. 10 muestra la respuesta en frecuencia obtenida del resonador óptico 55 integrado en la guía de ondas 50, en función de la frecuencia de las ondas acústicas generadas por una fuente acústica puntual e incidentes en el resonador óptico 55. Se determinó un ancho de banda de 230 MHz a una frecuencia de detección central de 105 MHz. El gráfico 90 indica el cambio en la intensidad de la luz 42 acoplada fuera del resonador óptico 55 a través de la fibra con rejilla de Bragg 53 y detectada por el detector acoplado al segundo extremo de la guía de ondas 50, respectivamente, en función de la frecuencia de las ondas acústicas que inciden en el resonador óptico 55. Como se ilustra, se consigue un gran ancho de banda de detección.

20 La sensibilidad del resonador óptico 55 integrado en la guía de ondas 50 frente a los ultrasonidos 52 se determinó con ayuda de un hidrófono de aguja calibrado y resultó ser de 30 Pa en términos de presión equivalente de ruido sobre un ancho de banda de 25 MHz alrededor de la frecuencia central. De este modo, se puede alcanzar una alta sensibilidad en un amplio ancho de banda.

25 La guía de ondas 50 con resonador óptico 55 responde a ondas acústicas, tal como ultrasonidos, que inciden en la cara extrema 51 que tiene un diámetro comparativamente pequeño. Esto permite disponer varias guías de ondas 50 con un resonador óptico 55 en una matriz de sensores unidimensional o bidimensional, como se explicará más adelante con referencia a la Fig. 16.

30 La Fig. 11 muestra el espectro 95 del resonador óptico 55 integrado en la guía de ondas 50, en función de la longitud de onda de la luz. Se utilizó una técnica de medición con inversión espectral, que hace que la frecuencia de resonancia del resonador óptico aparezca como un pico negativo en el espectro. La respuesta espectral tiene un pico pronunciado 96, que corresponde a una resonancia del resonador óptico 55. La longitud de la porción interior del resonador óptico 55 y la longitud de onda de la luz generada por la fuente 31 (véase la Fig. 1) pueden coincidir. La luz que tiene la frecuencia de resonancia del resonador óptico adquiere un desplazamiento de fase que es aproximadamente π o aproximadamente un múltiplo entero de π al pasar a través de la longitud L_C (es decir, al cubrir la distancia desde la superficie de la rejilla de Bragg más cercana a la cara extrema y la superficie del al menos un reflector dispuesto más cerca de la rejilla de Bragg), y/o un desplazamiento de fase total de ida y vuelta en la porción interior del resonador óptico puede ser aproximadamente π o un múltiplo impar de π (es decir, π , 3π , 5π , 7π , etc.).

Una guía de ondas 50 como la descrita con referencia a la Fig. 6 y Fig. 7 puede ser particularmente adecuada para su uso en microscopía optoacústica, sin estar limitada a ello.

40 Pueden utilizarse otros tipos varios de guías de ondas. Por ejemplo, la guía de ondas con resonador óptico integrado puede realizarse en una plataforma de silicio en aislador (SOI) mediante el uso de técnicas de fabricación estándar de la industria microelectrónica y el campo de la fotónica de silicio.

La Fig. 8 es una vista esquemática en perspectiva de una guía de ondas 70 con un resonador óptico 75 integrado. La Fig. 9 es una vista en planta de una cara extrema 71 de la guía de ondas 70.

45 La guía de ondas 70 está formada sobre una oblea SOI. La guía de ondas 70 puede ser un circuito fotónico integrado. La guía de ondas 70 se extiende a lo largo de un eje longitudinal y tiene una cara extrema 71, también denominada faceta, que puede extenderse transversalmente, y en particular perpendicularmente, al eje longitudinal. Se aplica una capa ópticamente reflectante 74 sobre la cara extrema 71, por ejemplo, por medio de revestimiento o mediante el uso de cualquiera de las técnicas descritas anteriormente.

50 Se forma una rejilla de Bragg de fibra 73 en la guía de ondas 70. La rejilla de Bragg de fibra 73 está formada por ondulaciones 78 en las paredes laterales de la guía de ondas 70.

Además de la capa reflectante 74, pueden proporcionarse opcionalmente elementos ópticos adicionales 77 en la guía de ondas 70. Los elementos ópticos adicionales 77 pueden disponerse en la guía de ondas 70, de forma que se interpongan entre la parte interior del resonador óptico 75 y la capa ópticamente reflectante 74. Los elementos ópticos adicionales 77 pueden ser elementos reflectantes, tal como una rejilla de Bragg de fibra adicional más corta que la rejilla de Bragg 73, dispuesta en la guía de ondas 70.

La rejilla de Bragg de fibra 73 tiene una longitud L_B 83 a lo largo del eje longitudinal de la guía de ondas 70. La parte interior del resonador óptico 75 tiene una longitud L_C 85 a lo largo del eje longitudinal de la guía de ondas 70. Los elementos ópticos adicionales 77 tienen una longitud L_R 87 a lo largo del eje longitudinal. La rejilla de Bragg 73 comienza a una distancia L_G 86 igual a $L_R + L_C$ de la cara extrema 71.

- 5 Se han realizado experimentos para una guía de ondas 70 fabricada en una oblea SOI con una orientación de Si cristalino de (100). El resonador óptico 75 está formado en una guía de ondas de Si rectangular con una sección transversal de $220 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$, que está incrustada entre una capa de SiO_2 enterrada de $2 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor y un revestimiento de SiO_2 de $1,25 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor. La guía de ondas tiene aproximadamente 2 mm de longitud y está dividida en varias secciones. Una sección es la rejilla Bragg 73, que tiene una longitud L_B de $125 \text{ }\mu\text{m}$. La fibra con
10 rejilla de Bragg 73 forma una de las superficies ópticamente reflectantes del resonador óptico 75. Las variaciones periódicas del índice de refracción efectivo se producen añadiendo una ondulación lateral a la guía de ondas de Si con una periodicidad de 320 nm y un ciclo de trabajo del 50%. La profundidad de ondulación Δw (indicada por el signo de referencia 88) es de 40 nm .

- 15 La siguiente sección de la guía de ondas 70 es la porción interior del resonador óptico 75, que tiene una longitud L_C . La luz en la frecuencia de resonancia puede adquirir un desplazamiento de fase que es aproximadamente π o un múltiplo entero de π en un paso a través de la porción interior con longitud L_C (es decir, desde que sale de la rejilla de Bragg 73 hasta que incide en la rejilla de Bragg 77 adicional), y/o un desplazamiento de fase total de ida y vuelta en la porción interior con longitud L_C (es decir, desde que sale de la rejilla de Bragg 73 hasta que incide de nuevo en la rejilla de Bragg 73) puede ser aproximadamente π o un múltiplo entero impar de π (es decir, π , 3π , 5π , 7π , etc.).
20 Los elementos ópticos adicionales 77 forman otra rejilla de Bragg de fibra 77 de aproximadamente $10 \text{ }\mu\text{m}$ de longitud, en la que las variaciones periódicas del índice de refracción efectivo se producen añadiendo una ondulación lateral con una periodicidad de 320 nm y un ciclo de trabajo del 50%. La intersección de la guía de ondas y la superficie reflectante define el área de detección.

- 25 Como el alto contraste del índice de refracción en la plataforma SOI conduce a un fuerte confinamiento espacial del modo óptico en la guía de ondas, el área de detección corresponde a la sección transversal de la guía de ondas.

- El resonador óptico de silicio 75 fue probado para detectar señales ultrasónicas 72 generadas desde una fuente puntual ultrasónica de banda ancha (capa de Au de 200 nm , iluminada por un láser pulsado de 523 nm , duración del pulso 1 ns , enfocado sobre un punto de $3 \text{ }\mu\text{m}$). Se determinó que la respuesta en frecuencia del resonador óptico 75 tenía un ancho de banda de 230 MHz , con una frecuencia de detección central de 88 MHz . De este modo, se consigue
30 un gran ancho de banda.

La sensibilidad del resonador óptico de silicio 75 a los ultrasonidos se determinó con la ayuda de un hidrófono de aguja calibrado y resultó ser de 60 Pa en términos de presión equivalente de ruido sobre un ancho de banda de 25 MHz alrededor de la frecuencia central. De este modo se consigue una alta sensibilidad en un amplio ancho de banda.

- 35 En cualquiera de las guías de onda con resonador óptico integrado 25, 55, 75 descritas anteriormente, el extremo de la rejilla de Bragg 23, 53, 73 que mira hacia la cara extrema 21 está situado a una distancia de la cara extrema 21 que es $L_G = L_C$ si no se interponen elementos ópticos adicionales entre la porción interna del resonador óptico y la cara extrema 21, y que es $L_G = L_C + L_R$ cuando se interponen elementos ópticos adicionales entre la porción interna del resonador óptico y la cara extrema 21. La distancia L_G puede estar comprendida entre 100 nm y 1 cm , preferentemente entre 200 nm y 5 mm . La distancia L_G puede ser superior a 100 nm , en particular superior a 200 nm , en particular
40 superior a 500 nm . La distancia L_G puede ser preferentemente inferior a 10 mm , más preferentemente inferior a 1 mm , más preferentemente inferior a $100 \text{ }\mu\text{m}$, más preferentemente inferior a $1 \text{ }\mu\text{m}$, más preferentemente inferior a 500 nm . El resonador óptico 25, 55, 75 puede confinar la luz dentro de una porción de la guía de ondas que se encuentra dentro de un intervalo de 100 nm a 1 cm , preferentemente de 200 nm a 5 mm , desde la cara extrema 21 de la guía de ondas.

- 45 Las guías de ondas con resonador óptico 25, 55, 75 pueden utilizarse respectivamente de manera que la cara extrema con el reflector esté expuesta al estímulo que se desea detectar (que puede ser, por ejemplo, una onda acústica, en particular una onda ultrasónica, la temperatura u otros estímulos). Esto permite combinar varias guías de ondas con resonadores ópticos en un conjunto de sensores que proporciona una alta resolución espacial y permite integrar un gran número de sensores por unidad de superficie. Las guías de ondas con resonador óptico 25, 55, 75 también
50 pueden utilizarse de forma que la superficie lateral del resonador óptico 25, 55, 75 y/o la rejilla de Bragg 23, 53, 73 quede expuesta al estímulo que se desea detectar.

Los sensores que comprenden las guías de ondas con resonador óptico 25, 55, 75 tienen una amplia variedad de aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación:

a. Detección acústica

- 55 El resonador óptico 25, 55, 75 es muy sensible a las vibraciones mecánicas. Esto lo hace muy adecuado como detector acústico en diversos campos, tales como los ultrasonidos y las imágenes biomédicas, las imágenes optoacústicas/fotoacústicas y los ensayos no destructivos (END) de materiales.

b. Dispositivo de detección médico

La respuesta en frecuencia ultra-amplia del resonador óptico 25, 55, 75 permite medir una amplia variedad de tamaños de absorbedores y sus espectros de absorbencia óptica. En el contexto de la detección médica, esto permitiría controlar y analizar las características bioquímicas y biofísicas en las profundidades de los tejidos. La detección y monitoreo del espectro de absorción óptica de la sangre puede revelar información sobre parámetros metabólicos tal como la oxigenación de la sangre, así como parámetros físicos tales como la densidad y el diámetro medio de los vasos de la vasculatura, que a su vez es un indicador de la salud cardiovascular.

c. Biodetección

El diseño del resonador óptico 25, 55, 75, que está delimitado por dos superficies ópticamente reflectantes diferentes, crea un fuerte confinamiento de la luz muy cerca del extremo de la guía de ondas respectiva. Esto permite utilizar el resonador óptico 25, 55, 75 en el campo de la biodetección, donde, por ejemplo, se pueden monitorizar los cambios en la composición molecular y los parámetros físicos de una muestra. Por ejemplo, pueden inducirse plasmones de superficie (SP) cuando la capa reflectante de la cara extrema de la guía de ondas es metálica o contiene partículas metálicas. Otra variante consiste en aplicar una capa reflectante semitransparente o extremadamente fina. De este modo, el modo óptico confinado en la guía de ondas quedará expuesto al entorno y podrá interactuar con la muestra examinada.

d. Detección de temperatura

La longitud de onda de resonancia del resonador óptico 25, 55, 75 depende de la longitud del resonador óptico, así como de los parámetros de la rejilla de Bragg. Por consiguiente, el control de la frecuencia de resonancia, de un desplazamiento de la frecuencia de resonancia o de otras características espectrales o de sus cambios a lo largo del tiempo permite realizar mediciones exactas de la temperatura. Esto puede dar lugar, por ejemplo, a sensores de temperatura de tamaño ultrapequeño como dispositivo independiente o a un sensor combinado de temperatura y ultrasonidos para aplicaciones de ablación de tejidos.

e. Imágenes de diferenciación de frecuencias

Debido al alto confinamiento de modo en algunas guías de onda, es posible crear resonadores ópticos asimétricos ultraminiaturizados, que tengan una estructura como la descrita anteriormente. Los tamaños de sensor submicrónicos dan lugar a una respuesta en frecuencia ultra-amplia del sensor de varios cientos de MHz. Por ejemplo, en el campo de las imágenes optoacústicas/fotoacústicas, la frecuencia central de las señales ultrasónicas emitidas por un absorbente es proporcional a su tamaño. Como resultado, un resonador óptico asimétrico permite resolver las frecuencias centrales y marcar cada uno de los absorbedores en función de su tamaño. Como información complementaria, la atenuación dependiente de la frecuencia de los ultrasonidos en los tejidos permite también extraer conclusiones sobre la profundidad de los absorbentes detectados. Estos dos niveles de información permiten añadir un contraste dependiente del tamaño y la profundidad a la modalidad optoacústica en aplicaciones de imagen, así como en detección biomédica (como se describe en el uso ejemplar "b. Dispositivo de detección médico" anterior). Por medio del cálculo de los retardos temporales de las señales ultrasónicas, se pueden calcular las variaciones de la velocidad del sonido, complementando las mediciones con información de densidad y composición. Por ejemplo, un análisis espectral de las señales ultrasónicas de la piel adquiridas por medio de una medición puntual puede indicar la densidad y profundidad de los vasos sanguíneos.

f. Proyección de imágenes

Los tamaños de sensor submicrónicos darán lugar a un ángulo de detección ultraalto superior a 100°. Esto permite emplear el procedimiento mencionado en el uso ejemplar "e. Imágenes de diferenciación de frecuencias" para monitorizar las propiedades de la vasculatura en una gran superficie de piel de varios mm² sin necesidad de escaneado de trama.

El resonador óptico funciona en modo de reflexión óptica. La luz 41 acoplada al resonador óptico a través de la rejilla de Bragg y la luz de retorno 42 acoplada al resonador óptico a través de la rejilla de Bragg atraviesan el mismo segmento de la guía de ondas en direcciones opuestas. La guía de ondas con resonador óptico puede utilizarse opcionalmente en combinación con una cavidad acústica que recoge y enfoca las señales acústicas en la guía de ondas con resonador óptico integrado, como se explicará con más detalle en referencia a las Fig. 12 a Fig. 14.

La Fig. 12 muestra un sensor 10 de acuerdo con una realización. El sensor 10 comprende un transductor acústico y un espejo acústico 100. El transductor acústico puede configurarse como una guía de ondas 20 que puede tener cualquiera de las configuraciones explicadas con referencia a las Fig. 1 a Fig. 11 anteriores. La guía de ondas puede comprender un resonador óptico adyacente a una cara extrema de la guía de ondas 20, estando el resonador óptico formado por una rejilla de Bragg en un lado y al menos un reflector que no es idéntico a la rejilla de Bragg en el lado opuesto, extendiéndose entre ellos una porción interior del resonador óptico. Pueden utilizarse otros transductores acústicos.

El espejo acústico 100 tiene una superficie reflectante acústica 102 que tiene forma de parte de la superficie de un elipsoide rotacional. La superficie reflectante acústica 102 es un límite de una cavidad acústica 107 que está rebajada con respecto a una superficie frontal 103 del espejo acústico 100. La superficie de la cara 103 puede ser plana o puede de otro modo definir un plano. A modo de ilustración, la superficie frontal 103 puede tener una porción anular para apoyarse en una muestra, cuya superficie anular puede definir un plano de referencia para la orientación de la superficie reflectora acústica 102 que forma parte de un elipsoide rotacional.

El espejo acústico 100 está generalmente configurado para recoger y enfocar señales acústicas sobre un transductor de ultrasonidos instalado dentro de la cavidad.

El espejo acústico 100 permite la implementación de la detección optoacústica en modo reflexión en aplicaciones y dispositivos que antes no eran accesibles, por ejemplo, debido a limitaciones de tamaño y geometría. El espejo acústico 100 incluye una cavidad acústica elipsoidal 107 con dos volúmenes focales acústicos, también denominados "focos acústicos". Los focos acústicos pueden estar situados en los puntos focales 104, 105 del elipsoide rotacional que define la superficie de reflexión 102. La cavidad acústica elipsoidal 107 está configurada de forma que un primer foco 104 está dentro de la cavidad acústica 107 y un segundo foco 105 está fuera de la cavidad acústica 107. Cuando una fuente acústica se posiciona en o cerca del segundo foco exterior 105, por ejemplo, sus señales acústicas serán recogidas y proyectadas sobre el primer foco interior 104 dentro de la cavidad 107. En este primer foco interior 104, el transductor acústico se coloca y registra las señales acústicas amplificadas.

Un mecanismo de retención puede posicionar el transductor acústico en relación al espejo acústico 100. A modo de ilustración, el mecanismo de retención puede comprender un pasaje 108 que se extiende a través del espejo acústico 100 desde una superficie lateral del mismo hasta la cavidad acústica 107. El transductor acústico puede ser retenido por el pasaje 108 a fin de posicionar el transductor acústico en proximidad a, preferentemente en relación de superposición con el primer foco 104. También pueden utilizarse otros mecanismos de retención.

Un aspecto importante del espejo acústico 100 es que un eje principal 106 del elipsoide está inclinado, por ejemplo, con respecto al plano definido por la superficie de la cara 103. Esto permite que las ondas acústicas procedentes del exterior de la cavidad acústica 107 se enfoquen en el primer foco 104 dentro de la cavidad acústica 107, donde son captadas por el transductor acústico.

Un ángulo entre el eje principal 106 y el plano definido por la superficie frontal 103 puede ser igual o superior a 5° , en particular igual o superior a 10° , en particular igual o superior a 12° . El ángulo de inclinación máximo entre el eje principal 106 con respecto al plano definido por la superficie frontal 103 puede ser de 90° .

El espejo acústico 100 puede permitir que un haz de excitación optoacústica 110 entre en la cavidad acústica a través de una segunda abertura 109 y la atraviese sin que la trayectoria del haz coincida con el transductor acústico instalado en el primer foco 104 del elipsoide, desacoplando eficazmente la trayectoria de excitación de la trayectoria acústica. Alternativamente, el espejo acústico 100 puede estar fabricado de, o puede comprender, un material ópticamente transparente para permitir que el haz de excitación 110 se transmita a través del espejo acústico 100 sin necesidad de una segunda abertura. En este caso, es necesario implementar una óptica de corrección para la posible difracción óptica debida a la forma del espejo acústico 100. El haz de excitación puede ser luz, otra radiación electromagnética o un haz de partículas.

Una diferencia significativa en la impedancia acústica del espejo acústico 100 y un medio de acoplamiento que puede proporcionarse en la cavidad acústica 107 puede garantizar una alta reflectividad acústica. Para aplicaciones que no permiten el uso de componentes metálicos, tales como el novedoso campo de las imágenes magnetacústicas o las mediciones muy próximas a campos electromagnéticos, la cavidad acústica puede crearse a partir de materiales no metálicos, tal como plásticos (por ejemplo, PVC).

El transductor acústico puede ser un elemento piezoeléctrico, un transductor capacitivo (CMUT) o un transductor óptico de ultrasonidos. En particular, el transductor acústico puede comprender la guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con cualquiera de las realizaciones aquí divulgadas, y como se describe con más detalle con referencia a las Fig. 1 a Fig. 11.

El espejo acústico 100 con la abertura 108 para permitir que el transductor acústico pase a la cavidad acústica 107 permite una geometría de epi-iluminación para la detección fotoacústica/optoacústica en diversas aplicaciones tales como imágenes biomédicas, detección médica y pruebas no destructivas.

El sensor que comprende el espejo acústico 100 aborda una limitación común a la detección optoacústica, que es causada por el requisito de excitar una señal optoacústica en un volumen dado y simultáneamente interrogar el mismo volumen por un transductor acústico. Esto es especialmente importante en el caso de los objetos de tamaño micrométrico en imágenes optoacústicas y ensayos no destructivos (END), debido a las limitaciones físicas del tamaño del transductor y las geometrías de configuración. El tamaño de los transductores acústicos sensibles convencionales suele impedir que la excitación y la detección acústica se realicen desde el mismo lado de una muestra determinada. En consecuencia, la detección optoacústica suele realizarse en geometrías de modo de transmisión, lo que limita las aplicaciones a muestras delgadas.

Por el contrario, el espejo acústico 100 permite que la excitación y la detección optoacústica se realicen en modo de reflexión, donde el haz de excitación 110 y el transductor acústico están situados en el mismo lado de la muestra. El haz de excitación 110 para la excitación optoacústica puede entrar en el espejo acústico 100 a través de su abertura 109 en su parte inferior y viajar a través de la cavidad acústica 107. Un foco del haz 110 puede coincidir con el segundo foco exterior 105 del espejo acústico 100, aunque no es necesario que la energía de excitación esté enfocada. Las señales acústicas generadas por el haz de excitación 100 son recogidas por el espejo acústico 100 y enfocadas hacia el primer foco interior 104, donde se sitúa el transductor acústico para registrar las señales acústicas amplificadas.

El sensor explicado con referencia a la Fig. 12 tiene una amplia variedad de aplicaciones, algunas de las cuales se describen a continuación:

a. Imágenes optoacústicas

La microscopía optoacústica (OAM) así como la tomografía OA (OAT) registran imágenes de contraste de absorción de especímenes orgánicos y no orgánicos basadas en el efecto fotoacústico. En microscopía, es deseable aplicar esta modalidad óptica potente y sin etiquetas además de las modalidades de microscopía existentes, tales como la microscopía confocal y la microscopía de fluorescencia multifotónica. Sin embargo, la necesidad de una geometría en modo de transmisión y la interferencia del espejo acústico con la trayectoria del haz de excitación en modo de reflexión son actualmente factores limitantes. El espejo acústico 100 supera estos obstáculos sin recortes en términos de sensibilidad y ancho de banda en comparación con los sensores implementados actualmente en geometrías de modo de transmisión. De este modo, el espejo acústico 100 permite una implementación sencilla de OAM y OAT en configuraciones estándar de microscopía multimodal. En el caso de los objetivos de inmersión en agua, el medio de acoplamiento se extendería a través de la abertura y un adaptador podría sellar la interfaz con el objetivo del microscopio. Pueden introducirse microactuadores en el adaptador a fin de ajustar la posición del foco acústico exterior en relación con el foco óptico. El foco óptico puede escanearse por medio de espejos galvanométricos a lo largo del plano acústico exterior.

b. Sensor médico no invasivo

En la espectroscopia OA, se registra un espectro fotoacústico de un espécimen dado observando la absorción óptica y su señal acústica emitida a diferentes longitudes de onda ópticas. Este procedimiento puede aplicarse para investigar muestras biomédicas, así como para estudiar la composición de sólidos, líquidos y gases en la detección medioambiental. Como aplicación biomédica, el tamaño en miniatura y el diseño del espejo acústico 100 permiten incrustar sensores en dispositivos portátiles. Al combinar el espejo acústico 100 con iluminación rentable (por ejemplo, diodos láser) y UST (tales como elementos piezoeléctricos o las guías de ondas con resonadores ópticos integrados que se explican con referencia a las Fig. 1 a Fig. 11), esta combinación permite la amplia aplicación de OA en dispositivos médicos. Un sensor médico habilitado por el espejo acústico 100 podría entonces aplicarse en aplicaciones de monitorización doméstica/remota, permitiendo la alerta temprana de enfermedades y la monitorización en curso de la progresión de la enfermedad. La detección de la estructura bioquímica y los parámetros biofísicos de la piel, es decir, de la sangre y la vasculatura, permite realizar diagnósticos sobre enfermedades cardiovasculares y diabetes.

La Fig. 13 representa el principio de funcionamiento de dicho sensor 120. El sensor comprende un espejo acústico 100, un transductor acústico 123 y un mecanismo de retención para posicionar el transductor acústico 123 en relación con el espejo acústico 100. Una carcasa 121 puede alojar otros componentes, tal como un diodo láser. La información fisiológica del tejido y la vasculatura se adquiere a través del transductor acústico por medio de imágenes optoacústicas y espectroscopia de un dedo 122.

El espejo acústico 100 puede utilizarse como base para un sensor médico multimodal no invasivo. El espejo acústico 100, acústicamente adaptado y ópticamente transparente, está en contacto con el dedo humano 122 a través de una abertura. El haz de excitación sale de la fuente de luz e incide sobre la muestra 122. Las señales acústicas generadas se recogen y proyectan sobre un transductor acústico 123 colocado de forma que se superponga al foco acústico interior 104. Los contactos ópticos o eléctricos de entrada y salida del transductor acústico pueden atravesar transversalmente el espejo acústico 100.

c. Ensayos optoacústicos no destructivos (END)

De forma similar al campo bien establecido de los END por ultrasonidos láser, los END por OA suponen un gran paso adelante en la detección de defectos en materiales y equipos procesados. Una de las principales razones por las que el END por OA no se ha aplicado de forma generalizada, todavía, es la falta de movilidad y la necesidad de una geometría de modo de transmisión con corriente. Esta deficiencia se supera con el uso del espejo acústico 100. El espejo acústico 100 permite el END por OA. Por ejemplo, al ensayar materiales complejos tales como los compuestos de carbono, la alta sensibilidad y el mayor contenido en frecuencias del espejo acústico 100 con su transductor acústico -en comparación con los sensores puramente piezoeléctricos- resultan beneficiosos, ya que la amplitud de las señales ultrasónicas emitidas por estos pequeños absorbentes es reducida.

El concepto del espejo acústico 100 se probó en un experimento de microscopía OA. En este caso, el tamaño del espejo acústico representado en la Fig. 14 era de tan solo 10 mm × 8 mm, y la cavidad acústica 107 se rellenaba con un medio de acoplamiento acústico, tales como agua o gel de ultrasonidos, y se sellaba con una fina lámina de PE como medio ópticamente transparente. La cavidad acústica 107 se talló por medio de CNC en acero inoxidable endurecido para obtener altos coeficientes de reflexión cuando se aplica en el agua. El foco óptico del haz de excitación 110 coincidía con el foco acústico exterior 105 y en el foco acústico interior 104 se situaba un UST óptico 130 basado en una rejilla Bragg de desplazamiento de fase (π -FBG). El foco acústico interior 104 puede estar situado dentro o alineado con el UST óptico 130, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 14.

El rendimiento del espejo acústico 100 ha sido probado en múltiples experimentos en una configuración de microscopía OA. La caracterización se ha realizado con una señal optoacústica generada por un láser pulsado que opera a una longitud de onda de 515 nm y una tasa de repetición de 2 kHz y un absorbedor situado en el foco acústico exterior de la cavidad. Se comprobó que la amplificación de la señal acústica era del orden de 7 dB, mientras que su ancho de banda no se veía afectado por el espejo acústico 100. En conclusión, el espejo acústico 100 permitió la microscopía OA de epi-iluminación en un montaje multimodal y la microscopía simultánea de imágenes de segundo armónico (SHG).

La Fig. 15 es un diagrama de flujo de un procedimiento 140 de acuerdo con una realización. El procedimiento 140 puede llevarse a cabo mediante el uso de cualquiera de los sensores descritos en la presente memoria descriptiva que comprenden una guía de ondas con un resonador óptico integrado, que está formado por una rejilla de Bragg en un lado, por al menos un reflector que es diferente en la construcción de la rejilla de Bragg en el otro lado, y una parte interior del resonador óptico que se extiende entre ellos.

En la etapa 141, la luz se acopla al resonador óptico a través de la rejilla de Bragg.

En la etapa 142, se detecta al menos una característica espectral del resonador óptico o un cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico. La al menos una característica espectral o el cambio de al menos una característica espectral puede incluir una intensidad de la luz saliente, a una frecuencia fija, que se acopla fuera del resonador óptico. La al menos una característica espectral puede incluir una o varias frecuencias de resonancia del resonador óptico. La al menos una característica espectral o cambio de al menos una característica espectral puede incluir una intensidad o cambio de intensidad indicativo de un desplazamiento de una o varias frecuencias de resonancia del resonador óptico. La al menos una característica espectral o el cambio de al menos una característica espectral puede incluir una respuesta espectral medida para una pluralidad de frecuencias. La detección puede llevarse a cabo de manera resuelta en el tiempo.

En la etapa 143, las variaciones dependientes del tiempo en las características espectrales pueden utilizarse para un análisis o procesamiento posterior. A modo de ilustración, las variaciones en función del tiempo de las características espectrales pueden utilizarse para realizar al menos una de las siguientes operaciones: detección acústica; detección médica; biodetección; detección de temperatura; obtención de imágenes por diferenciación de frecuencias; obtención de imágenes por proyección; obtención de imágenes optoacústicas; ensayos optoacústicos no destructivos; detección química; detección plasmónica.

El pequeño tamaño de los sensores de acuerdo con las realizaciones facilita la combinación de varios sensores en un conjunto de sensores.

La Fig. 16 es una vista esquemática de un conjunto de sensores 150 de acuerdo con una realización. Una pluralidad de guías de ondas 151-158 que comprenden respectivamente un resonador óptico integrado puede proporcionarse en una matriz unidimensional o bidimensional. Un mecanismo de lectura 159 puede leer al menos una característica espectral de los resonadores ópticos o un cambio de al menos una característica espectral de los resonadores ópticos de las distintas guías de ondas 151-158, ya sea simultáneamente o secuencialmente en el tiempo. Las caras extremas de la pluralidad de guías de ondas 151-158 pueden estar dispuestas una al lado de la otra en una configuración coplanar.

La Fig. 17 es una vista esquemática de una guía de ondas con resonador óptico integrado de acuerdo con una realización.

En cualquiera de las guías de ondas descritas anteriormente, un elemento de acoplamiento acústico 161 puede estar unido a la cara extrema de la guía de ondas. El elemento de acoplamiento acústico 161 puede ser una célula. El elemento de acoplamiento acústico 161 puede tener cualquier forma y material, y puede seleccionarse a fin de realizar la adaptación de impedancia acústica, por ejemplo, entre el resonador óptico y el entorno en el que se va a realizar la detección. Se puede elegir una longitud 162 del elemento de acoplamiento acústico para que coincida con una o varias frecuencias centrales de ondas acústicas para las que se va a realizar la detección. Dependiendo de la longitud de onda deseada, la longitud 162 del elemento de acoplamiento acústico puede estar comprendida entre 1 μ m y 10 cm, preferentemente entre 2 μ m y 1 cm, más preferentemente entre 3 μ m y 5 mm.

Se apreciará que el elemento de acoplamiento acústico 161 no se muestra a escala en la Fig. 17. Típicamente, la longitud 162 del elemento de acoplamiento acústico 161 excederá significativamente la longitud del resonador óptico.

- En cualquiera de las realizaciones aquí divulgadas que utilizan una guía de ondas con resonador óptico asimétrico, la rejilla de Bragg y el al menos un reflector proporcionados en lados opuestos del resonador óptico son ópticamente reflectantes. Una periodicidad de la rejilla de Bragg puede corresponderse con la longitud L_C de la porción interior del resonador óptico, para asegurar que la rejilla de Bragg tiene una alta reflectividad a una frecuencia de resonancia del resonador óptico, siendo la frecuencia de resonancia de forma que la luz adquiere un desplazamiento de fase que es aproximadamente π o un múltiplo entero de π al pasar a través de la porción interior del resonador óptico (es decir, al cubrir la distancia desde la superficie de la rejilla de Bragg más cercana a la cara extrema y la superficie del al menos un reflector dispuesto más cerca de la rejilla de Bragg) y/o un desplazamiento de fase total de ida y vuelta en la porción interior el resonador óptico es aproximadamente π o un múltiplo impar de π (es decir, π , 3π , 5π , 7π , etc.).
- 10 Aunque las realizaciones se han descrito con referencia a los dibujos, pueden implementarse diversas alteraciones y modificaciones en otras realizaciones, dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. A modo de ilustración, aunque las realizaciones se han descrito con referencia a la detección por ultrasonidos, los sensores de acuerdo con las realizaciones no se limitan a ello, sino que pueden aplicarse a una amplia variedad de fines diferentes. La invención se define por medio de las reivindicaciones anexas 1-15.

15

REIVINDICACIONES

1. Un sensor (10; 120; 151-158), que comprende:

una guía de ondas (20; 50; 70) que tiene un eje longitudinal y una cara extrema (21; 51; 71), comprendiendo la guía de ondas (20; 50; 70) una rejilla de Bragg (23; 53; 73);
al menos un reflector (24; 28; 54; 74) en la cara extrema (21; 51; 71) de la guía de ondas (20; 50; 70);
en el que un resonador óptico (25; 55; 75) está formado por la rejilla de Bragg (23; 53; 73),
el al menos un reflector (24; 28; 54; 74), y
una porción interior del resonador óptico, estando la porción interior dispuesta entre la rejilla de Bragg (23; 53; 73) y el menos un reflector (24; 28; 54; 74), extendiéndose la porción interior del resonador óptico dentro de una porción de la guía de ondas (20; 50; 70) y estando formada monolíticamente con la guía de ondas (20; 50; 70); y
un detector (32) configurado para detectar al menos una característica espectral del resonador óptico (25; 55; 75) o un cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico (25; 55; 75).

2. El sensor de la reivindicación 1,

en el que el sensor (10; 120; 151-158) es un sensor acústico, un sensor de presión, un sensor de temperatura o un biosensor,
opcionalmente, en el que el resonador óptico (25; 55; 75) está configurado para confinar la radiación electromagnética en las proximidades de la cara extrema (21; 51; 71), y/o
en el que una longitud de detección del resonador óptico es menor que una longitud total del resonador óptico.

3. El sensor de la reivindicación 1 o de la reivindicación 2,

en el que el sensor (10; 120; 151-158) comprende además una fuente (33) configurada para suministrar radiación electromagnética al resonador óptico (25; 55; 75) a través de la rejilla de Bragg (23; 53; 73), y
en el que el detector (32) está configurado para detectar la radiación electromagnética (42) que pasa desde el resonador óptico (25; 55; 75) a través de la rejilla de Bragg (23; 53; 73) y se propaga a lo largo de la guía de ondas (20; 50; 70),
opcionalmente, en el que el detector (32) está configurado para detectar al menos uno de los siguientes elementos
una respuesta espectral del resonador óptico (25; 55; 75);
un cambio en una respuesta espectral del resonador óptico (25; 55; 75) en función del tiempo;
una intensidad de radiación electromagnética (42) acoplada fuera del resonador óptico (25; 55; 75);
un cambio en la intensidad de la radiación electromagnética (42) acoplada desde el resonador óptico (25; 55; 75) en función del tiempo, y/o
opcionalmente, el detector (32) está configurado para detectar un cambio en la intensidad de la radiación electromagnética (42) a una frecuencia fija.

4. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores,

en el que el al menos un reflector (24; 28; 54; 74) comprende al menos una capa reflectante (24; 54; 74),
opcionalmente en el que la al menos una capa reflectante comprende al menos una capa metálica y/o al menos una capa dieléctrica recubierta directamente sobre la cara extrema (21; 51; 71) de la guía de ondas (20; 50; 70) o sobre un soporte diferente de la guía de ondas (20; 50; 70), y/o
en el que el al menos un reflector comprende partículas (28) o un material configurado de forma que se generen en él plasmones de superficie para formar el resonador óptico (25) con la rejilla de Bragg (23), siendo la al menos una característica espectral al menos una frecuencia de resonancia del resonador óptico (25) que se desplaza en respuesta a la interacción de una muestra (122) con las partículas (28) o el material.

5. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores comprende además un elemento de acoplamiento acústico (161) fijado a la cara extrema de la guía de ondas (20; 50; 70), opcionalmente en el que el elemento de acoplamiento acústico (161) tiene una longitud elegida para que coincida con una frecuencia central de una onda acústica que se va a detectar.

6. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además

un espejo acústico (100) y un mecanismo de retención (108) para posicionar el resonador óptico (25; 55; 75) con respecto al espejo acústico (100),
opcionalmente, en el que el espejo acústico (100) comprende una superficie (102) que define al menos una porción de un elipsoide rotacional, en el que un eje mayor (106) del elipsoide rotacional está inclinado con respecto a una superficie frontal (103) del espejo acústico, y en el que la superficie (102) que define al menos una porción del elipsoide rotacional está rebajada con respecto a la superficie frontal (103), y/o
opcionalmente, en el que el mecanismo de retención está configurado para posicionar la guía de ondas (20; 50; 70) de forma que la guía de ondas (20; 50; 70) se superponga a un punto focal (104) del elipsoide

rotacional o esté situada en proximidad al punto focal (104) del elipsoide rotacional, además, opcionalmente, en el que el punto focal (104) está situado dentro de una cavidad acústica (107) del espejo acústico (100).

7. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la guía de ondas es una fibra óptica.
8. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la guía de ondas es una guía de ondas de silicio.
- 5 9. El sensor de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la porción interior del resonador óptico tiene una longitud (85) inferior a 100 μm , en particular inferior a 1 μm .
- 10 10. El sensor de una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la longitud (35; 85) de la porción interior del resonador óptico es más corta que una longitud (63; 83) de la rejilla de Bragg (23; 53; 73).
11. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el resonador óptico está adaptado de forma que un desplazamiento de fase de la luz interrogadora (41) al pasar a través de la porción interior (35; 85) es aproximadamente π , o en el que el resonador óptico está adaptado de forma que un desplazamiento de fase de la luz interrogadora (41) al pasar a través de la porción interior (35; 85) es aproximadamente un múltiplo entero impar de π .
- 15 12. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la longitud (35; 85) de la porción interior del resonador óptico se ajusta a una periodicidad de la rejilla de Bragg, opcionalmente en el que la longitud (35; 85) de la porción interior del resonador óptico es igual a un período de la rejilla de Bragg o a un múltiplo entero de un período de la rejilla de Bragg.
- 20 13. Un conjunto de sensores (150), que comprende: una pluralidad de sensores (151-158) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, opcionalmente en el que la pluralidad de sensores (151-158) están dispuestos en un conjunto unidimensional o en un conjunto bidimensional.
14. Un procedimiento de detección, que comprende:
posicionamiento de un sensor (10; 120; 151-158) con respecto a una muestra (122), en el que el sensor (10; 120; 151-158) comprende:
25 una guía de ondas (20; 50; 70) que tiene un eje longitudinal y una cara extrema (21; 51; 71), comprendiendo la guía de ondas (20; 50; 70) una rejilla de Bragg (23; 53; 73);
al menos un reflector (24; 28; 54; 74) en la cara extrema (21; 51; 71) de la guía de ondas (20; 50; 70);
en el que un resonador óptico (25; 55; 75) está formado por la rejilla de Bragg (23; 53; 73),
el al menos un reflector (24; 28; 54; 74), y
30 una porción interior del resonador óptico, estando la porción interior dispuesta entre la rejilla de Bragg (23; 53; 73) y el menos un reflector (24; 28; 54; 74), en el que la porción interior del resonador óptico se extiende dentro de una porción de la guía de ondas (20; 50; 70) y está formada monolíticamente con la guía de ondas (20; 50; 70); y
35 detectar al menos una característica espectral del resonador óptico (25; 55; 75) o un cambio de al menos una característica espectral del resonador óptico (25; 55; 75).
15. El procedimiento de detección de la reivindicación 14, en el que la al menos una característica espectral detectada del resonador óptico (25; 55; 75) o el cambio de la al menos una característica espectral del resonador óptico (25; 55; 75) se utiliza para realizar al menos uno de los siguientes:
40 detección acústica;
detección médica;
biosensores;
detección de temperatura;
imágenes de diferenciación de frecuencias;
imágenes de proyección;
45 imágenes optoacústicas;
ensayos optoacústicos no destructivos;
detección química;
detección plasmónica; y/o
en el que el sensor (10; 120; 151-158) es el sensor de cualquiera de las reivindicaciones 2 a 12.

50

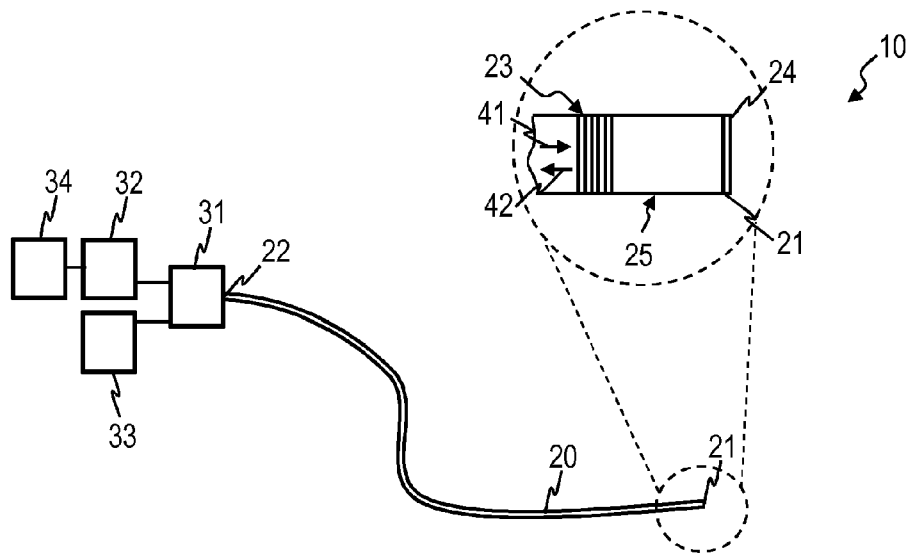


FIG. 1

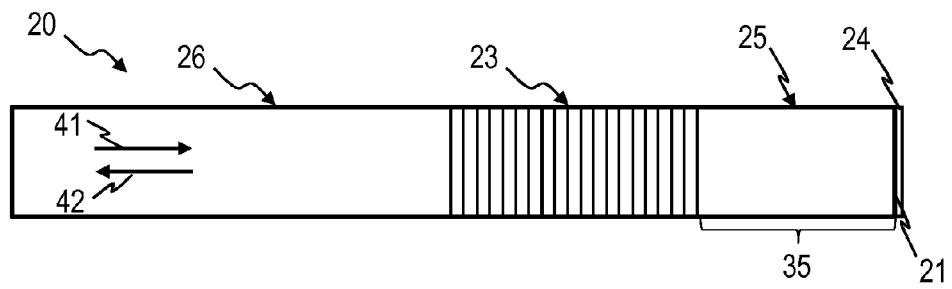


FIG. 2

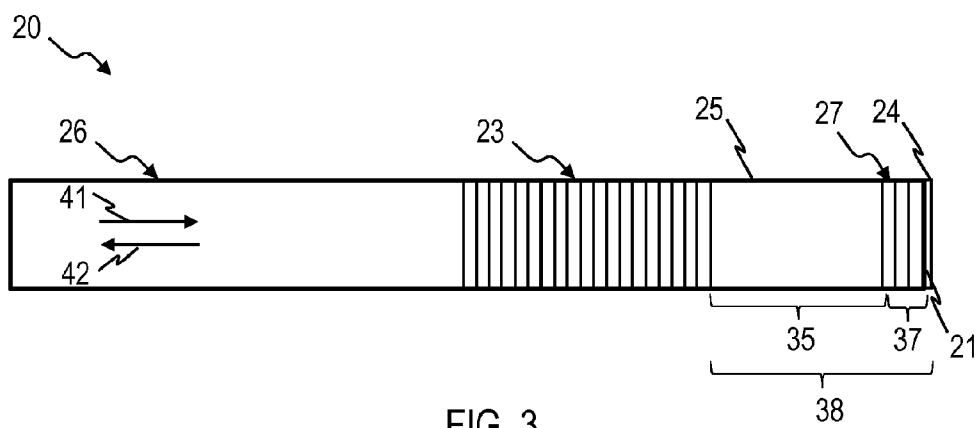


FIG. 3

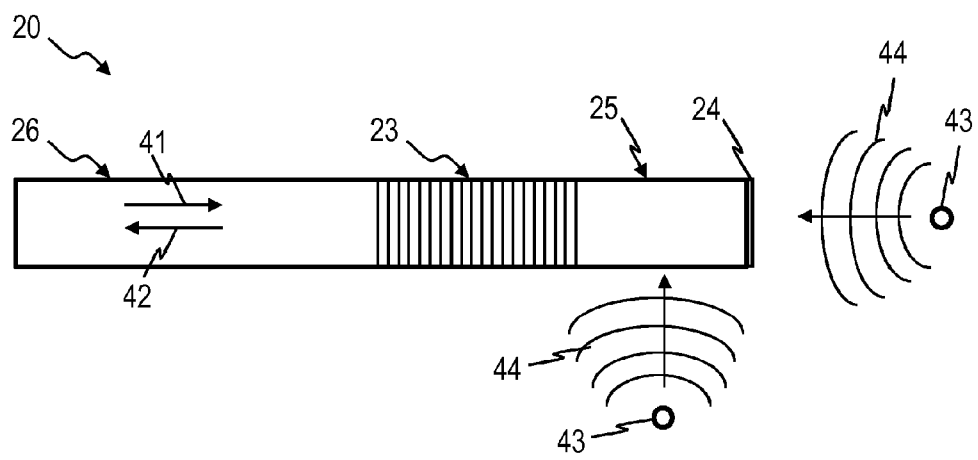


FIG. 4

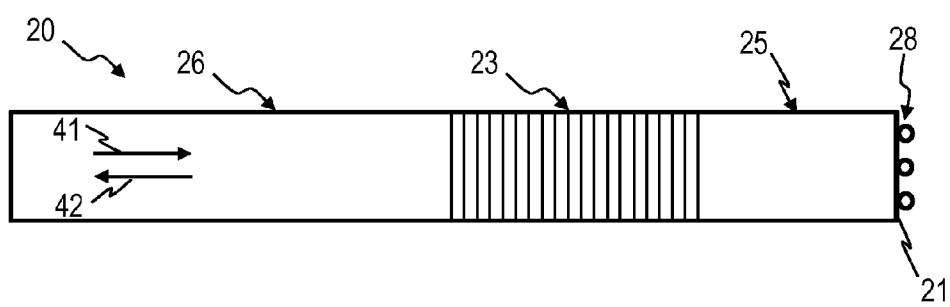


FIG. 5

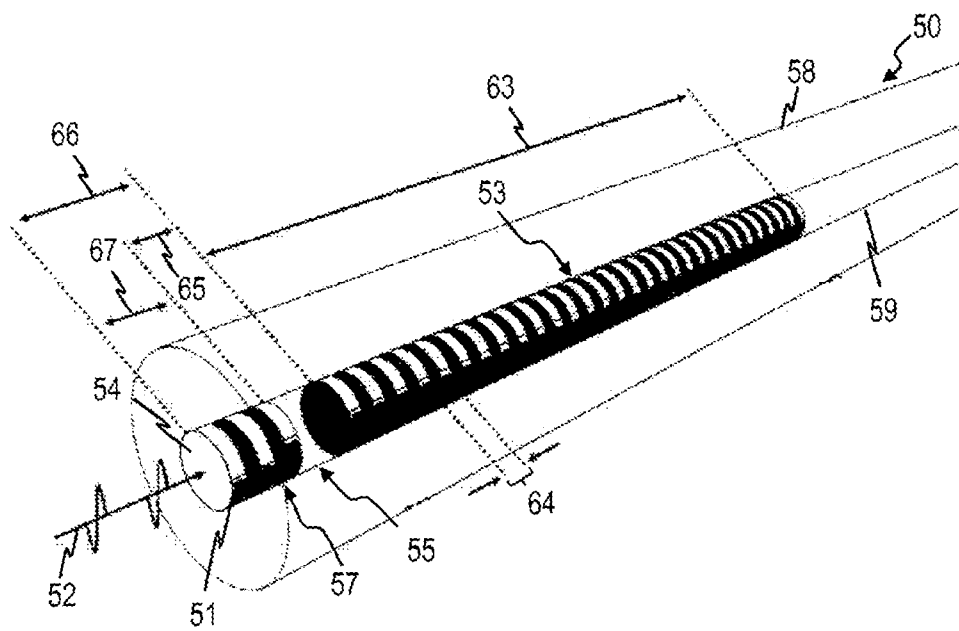


FIG. 6

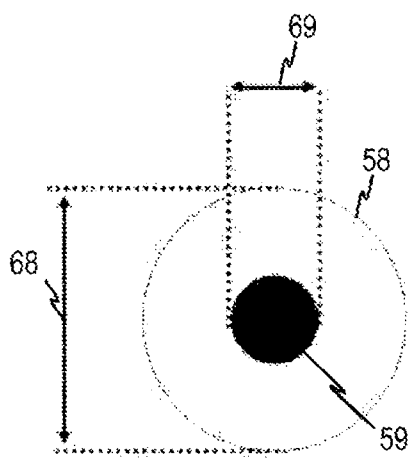


FIG. 7

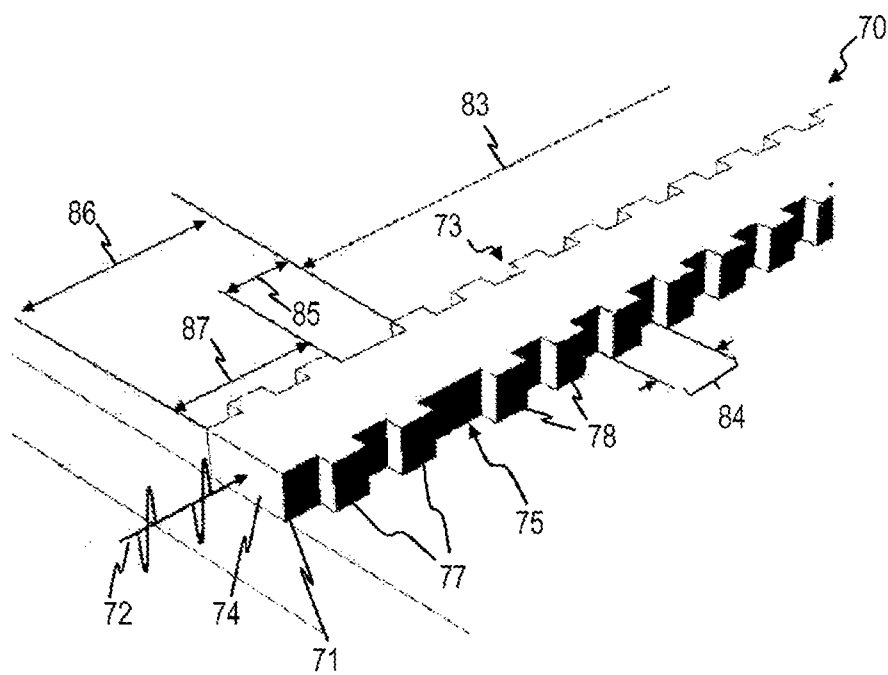


FIG. 8

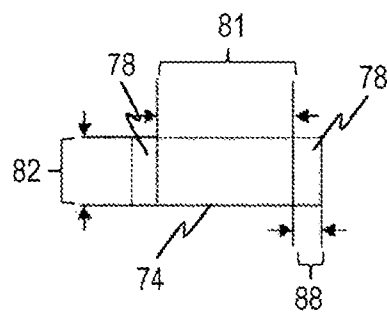


FIG. 9

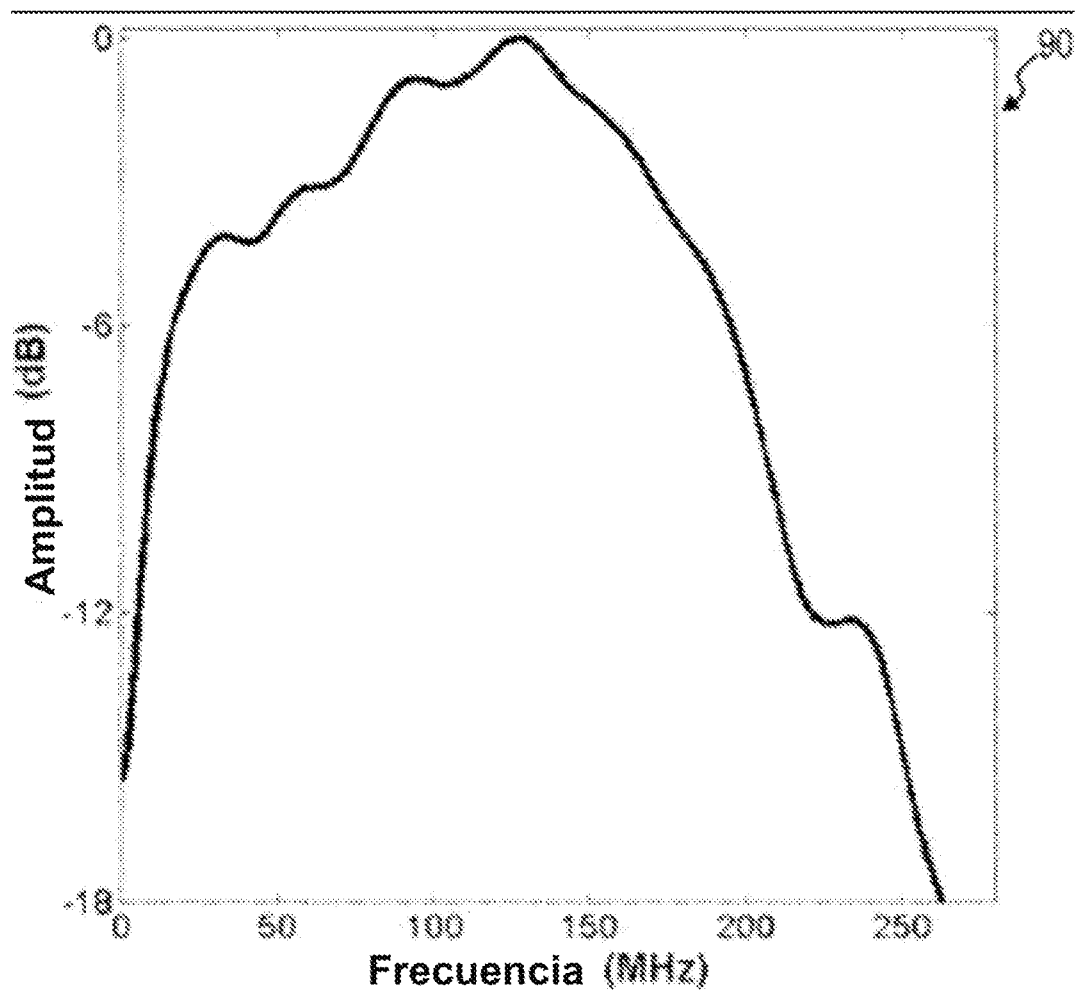


FIG. 10

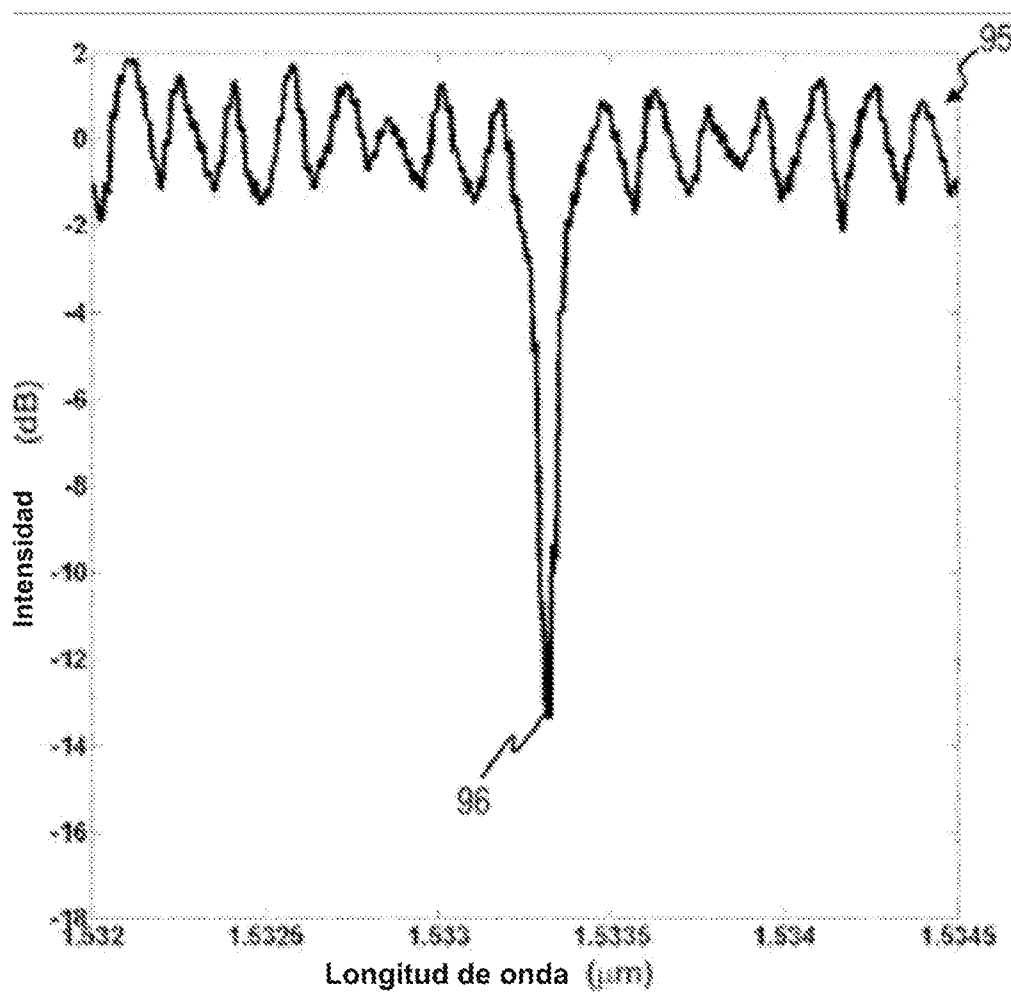


FIG. 11

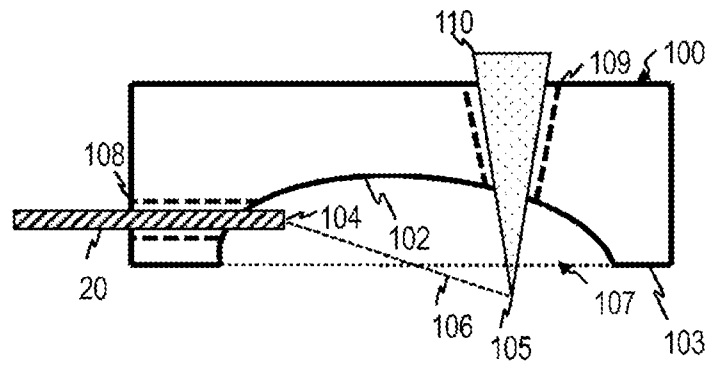


FIG. 12

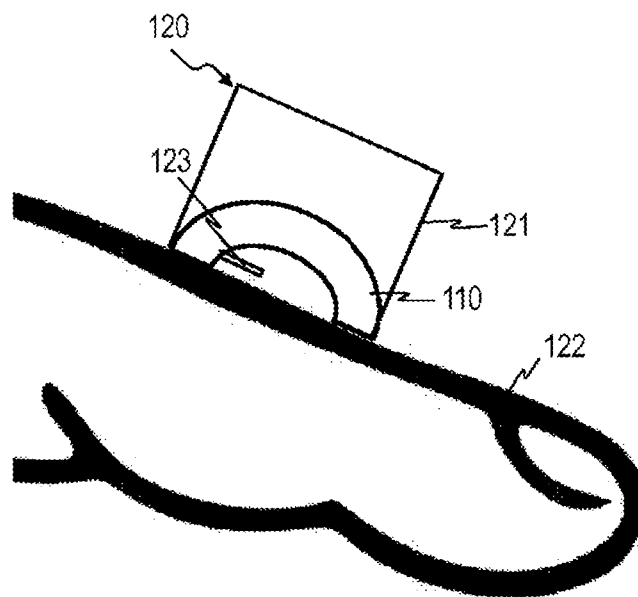


FIG. 13

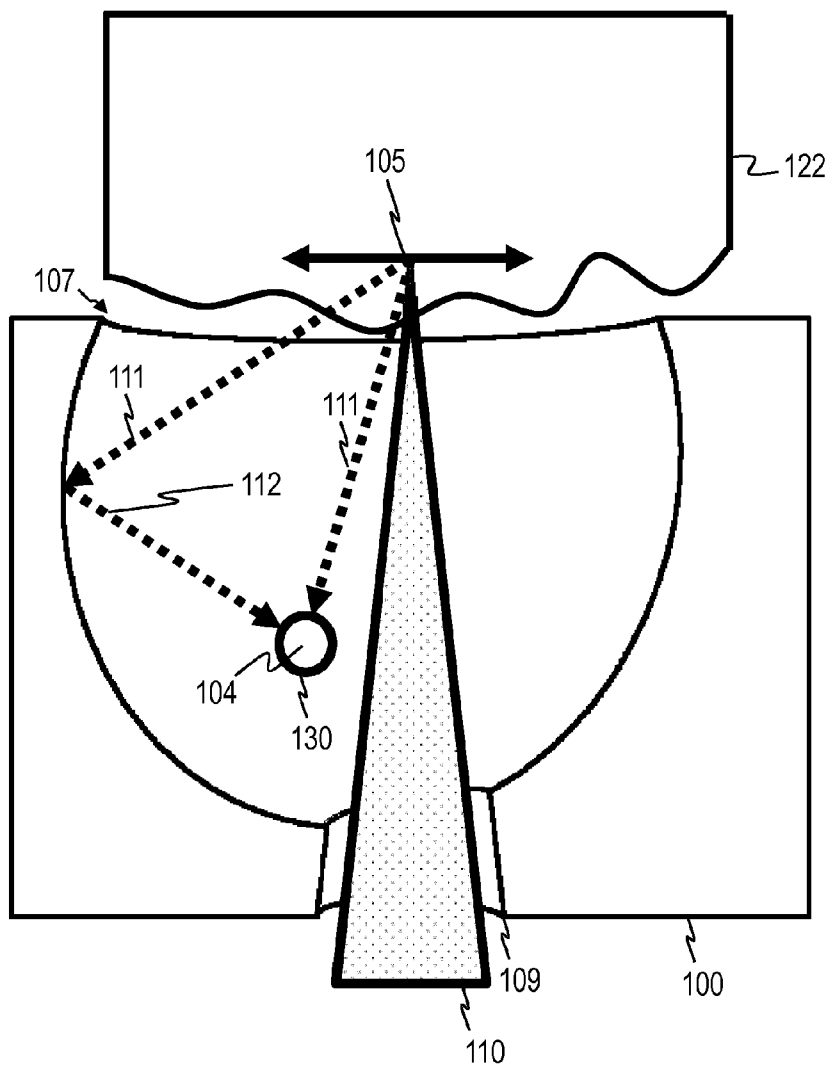


FIG. 14

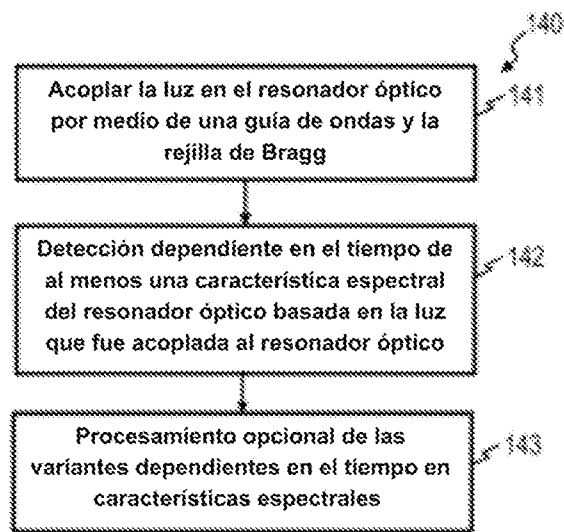


FIG. 15

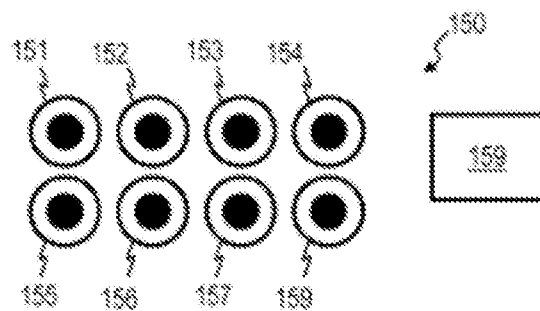


FIG. 16

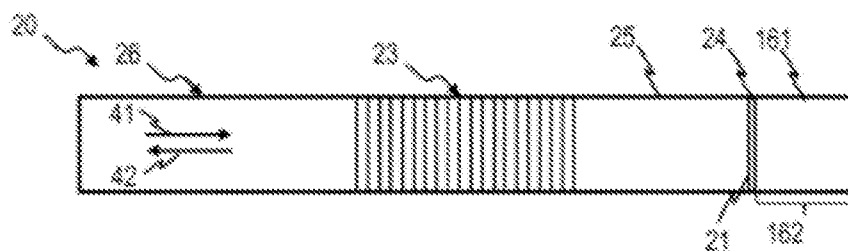


FIG. 17