

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 974 269**

51 Int. Cl.:

**G01B 11/16** (2006.01)

**A61B 5/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.05.2019 PCT/AU2019/050558**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.12.2019 WO19227170**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.05.2019 E 19810388 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2024 EP 3803267**

54 Título: **Método y dispositivo para evaluar una propiedad mecánica de un material**

30 Prioridad:

**01.06.2018 AU 2018901981**

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

**26.06.2024**

73 Titular/es:

**ONCORES MEDICAL PTY LTD. (100.0%)  
Suite 5, 24 Leura Street  
Nedlands, WA 6009, AU**

72 Inventor/es:

**KENNEDY, BRENDAN y  
WIJESINGHE, PHILIP**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 974 269 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

Método y dispositivo para evaluar una propiedad mecánica de un material

### Campo de la invención

5 La presente invención se refiere en términos generales a un método y dispositivo óptico para evaluar una propiedad mecánica de un material.

### Antecedentes de la invención

10 El presente solicitante ha desarrollado una técnica de palpación óptica, que se describe en la Solicitud de Patente Internacional PCT de Número PCT/AU2016/000019. La técnica de palpación óptica (OP, por sus siglas en inglés) descrita y desarrollada se puede usar para distinguir entre diferentes tipos de materiales, tales como materiales más rígidos o sanos más blandos. Por ejemplo, el material puede ser tejido biológico. En la OP, una capa sensora se comprime contra el material tisular. La capa sensora se deforma (cambia de espesor) según las fuerzas entre la capa sensora y el tejido. La tomografía de coherencia óptica (OCT, por sus siglas en inglés) se usa para medir el espesor de la capa, en particular el espesor antes y después de la compresión. La deformación se estima en todo el campo de visión. La tensión o fuerza se determina a partir de la deformación y de una respuesta tensión-deformación caracterizada previamente del material.

15 La Publicación Internacional PCT de Número WO 2016/119011 describe un dispositivo OCT y un método para evaluar una propiedad mecánica de un material. Además, Kennedy et al. (Kelsey M. Kennedy et al; vol. 5, 27 de octubre de 2015 (2015-10-27), página 15538, XP0055333418, DOI: 10.1038/srep18838) describe un dispositivo y método para obtener imágenes de la elasticidad de tejidos usando elastografía de coherencia óptica por compresión.

20 La presente invención proporciona una mejor adicional.

### Sumario de la invención

En un primer aspecto de la presente invención se proporciona un método para evaluar una propiedad mecánica de un material, comprendiendo el método:

proporcionar el material;

25 proporcionar un dispositivo para evaluar la propiedad mecánica del material, comprendiendo el dispositivo:

una capa sensora con un espesor, una superficie sensora y una superficie opuesta, siendo la capa sensora deformable de manera que, cuando la superficie sensora está en contacto directo o indirecto con el material y se aplica una carga adecuada a través de tanto la capa sensora como de al menos una parte del material, se deforma la capa sensora y la superficie sensora se mueve con respecto a la superficie opuesta;

30 una fuente de radiación electromagnética en comunicación óptica con la capa sensora, disponiéndose la fuente para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que es del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa sensora o más larga que el espesor de la capa sensora; y

35 un detector para detectar la radiación electromagnética y que está en comunicación óptica con la capa sensora y dispuesto para recibir la radiación electromagnética después de que la radiación electromagnética se refleja en la interfaz en la superficie sensora de la capa sensora;

el método comprende además:

colocar la capa sensora con respecto al material de manera que la superficie sensora esté en contacto directo o indirecto con el material;

40 aplicar la carga adecuada a través de tanto la capa sensora como de al menos una parte del material mediante lo cual se deforma la capa sensora y la interfaz en la superficie sensora se mueve con respecto a una condición en la que no se aplica carga;

dirigir la radiación electromagnética a la interfaz en la superficie sensora de manera que al menos una parte de la radiación electromagnética se refleje en la interfaz por lo cual se genera una primera señal;

dirigir la radiación electromagnética a lo largo de un segundo camino óptico para generar una segunda señal;

45 permitir que la primera señal y la segunda señal interfieran y detectar una intensidad asociada con una señal de interferencia resultante usando el detector; y

determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material a partir de la intensidad detectada de la señal de interferencia.

La etapa de determinar la información relativa a la propiedad mecánica puede comprender determinar una posición relativa de la interfaz en la superficie sensora, fijando la longitud del segundo camino óptico antes de la aplicación de la carga y sin variación en la longitud del segundo camino óptico que se requiere para medir una distancia que un límite de capa externa o un límite interno se ha movido debido a la aplicación de la carga adecuada.

5 La etapa de dirigir la radiación electromagnética a la interfaz en la superficie sensora puede comprender dirigir la radiación electromagnética hacia y a través de la capa sensora hasta la superficie sensora.

El método según una realización específica de la presente invención puede comprender además determinar un cambio en el espesor de la capa sensora, teniendo la capa sensora un espesor relajado conocido y predeterminado que es el espesor que tiene la capa cuando no se aplica carga, siendo el cambio en el espesor de la capa sensora el determinado usando el espesor relajado conocido y un cambio en la posición relativa de la interfaz en la superficie sensora como consecuencia de la deformación cuando se aplica la carga.

10

La etapa de determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material puede comprender determinar el cambio en el espesor de la capa sensora a partir de la intensidad detectada de la señal de interferencia y determinar la propiedad mecánica del material a partir del cambio determinado del espesor de la capa sensora.

15 El método normalmente comprende determinar el cambio en el espesor de la capa sensora a partir de una única señal de interferencia. Alternativamente, el método puede comprender determinar el cambio en el espesor de la capa sensora a partir de dos señales de interferencia, que se pueden generar a partir de reflexiones en las interfaces superior e inferior de la capa sensora.

Los inventores se han dado cuenta de que el conocimiento sobre la deformación (cambio de espesor) de la capa sensora es suficiente para realizar una medición de palpación óptica. En consecuencia, no es necesario escanear toda la profundidad de la capa sensora (como se realiza con OCT, que normalmente usa una fuente de luz de banda ancha con una longitud de coherencia mucho más corta que el espesor de la capa) y un dispositivo para evaluar la propiedad mecánica del material puede ser más simple que un dispositivo OCT. Por ejemplo, dependiendo del espesor de la capa sensora cuando la misma no está comprimida, no hay necesidad de una fuente de luz de banda ancha y se puede usar una fuente de luz de banda más estrecha y simple (tal como un LED) con una longitud de coherencia más larga. Además, la detección óptica puede ocurrir localmente en una implementación portátil del dispositivo para su uso en cirugía, se puede reducir el tiempo de detección y el dispositivo puede ser mucho más pequeño en comparación con un sistema OCT.

20

Determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material puede comprender determinar un cambio en una diferencia de la longitud del camino óptico entre la primera señal y la segunda señal a partir de una intensidad medida de la señal de interferencia detectada en respuesta a la adecuada carga aplicada a la capa sensora y al material. Además, determinar la información relativa a la propiedad mecánica puede comprender determinar la información a partir del cambio determinado en la diferencia de la longitud del camino óptico.

30

Los inventores han reconocido que la intensidad de la señal de interferencia detectada procedente de un reflector especular en la primera longitud del camino óptico como función del cambio en la diferencia de la longitud del camino óptico entre la primera señal y la segunda se puede considerar como una función gaussiana para la mayoría de las fuentes de luz. En consecuencia, existe una relación entre el cambio en el espesor de la capa sensora y la intensidad detectada. En consecuencia, el espesor de la capa sensora (o un cambio en el espesor) se puede determinar sin la necesidad de un aparato de exploración profunda (o de corte en profundidad) (tal como un aparato OCT).

35

La propiedad mecánica puede ser elasticidad o viscoelasticidad, y determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material puede comprender determinar la tensión experimentada por la capa sensora en base al cambio determinado en la diferencia de la longitud del camino óptico.

40

La fuente se puede disponer para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que proporcione una señal de interferencia para un intervalo de diferentes espesores de la capa sensora sin ajustar el segundo camino óptico.

45

La fuente de radiación electromagnética puede tener una longitud de coherencia que varía de aproximadamente el espesor de la capa a unos pocos múltiplos del espesor de la capa. Por ejemplo, la fuente de radiación electromagnética puede tener una longitud de coherencia mayor de 30, 50, 70, 100 o 200  $\mu\text{m}$ .

La superficie opuesta de la capa sensora puede ser una superficie estacionaria que es estacionaria con respecto a una parte de la carcasa del dispositivo cuando se aplica la carga adecuada a través de tanto la capa sensora como de al menos una parte del material. Alternativamente, la superficie opuesta de la capa sensora se puede mover o hacer vibrar de una manera conocida.

50

Dirigir la radiación electromagnética a lo largo del segundo camino óptico para generar la segunda señal puede comprender dirigir la radiación electromagnética a una interfaz en la superficie opuesta de la capa sensora y generar la segunda señal puede comprender reflejar la radiación electromagnética en la interfaz en la superficie opuesta.

55

Alternativamente, dirigir la radiación electromagnética a lo largo del segundo camino óptico para generar la segunda señal puede comprender dirigir la radiación electromagnética a un espejo y generar la segunda señal puede comprender reflejar la radiación electromagnética en el espejo.

5 Detectar una intensidad asociada con la señal de interferencia también puede comprender detectar un promedio temporal de intensidad y el método puede comprender analizar la intensidad promedio detectada de manera que se pueda determinar un cambio en el espesor de la capa sensora al menos en gran medida independiente de un ángulo de inclinación entre una longitud del camino óptico y una orientación relativa de la capa sensora, y/o de una condición de enfoque de una señal óptica en la capa sensora.

10 El dispositivo para evaluar la propiedad mecánica del material puede comprender además un espejo de escaneo para escanear la primera señal a través de la superficie sensora de la capa sensora y el método se puede realizar de manera que se pueda obtener una imagen o un mapa de la superficie sensora, incluyendo la imagen o el mapa características que son indicativas de una distribución de la deformación a través de la capa sensora.

15 Alternativamente, el dispositivo puede comprender una fibra óptica que vibra o gira para escanear la primera señal a través de la superficie sensora de la capa sensora y el método se puede realizar de manera que se pueda obtener una imagen o un mapa de la superficie sensora, incluyendo la imagen o el mapa características que son indicativas de una distribución de la deformación a través de la capa sensora.

20 En otra realización, el dispositivo comprende una pluralidad de fibras ópticas dispuestas para dirigir la radiación electromagnética en la capa sensora hacia la superficie sensora de manera que al menos una parte de la radiación electromagnética se refleje en la superficie sensora para generar la primera señal. En esta realización, el método se lleva a cabo de manera que se pueda obtener una imagen o un mapa de la superficie sensora.

El dispositivo para evaluar la propiedad mecánica del material puede ser un dispositivo portátil. El dispositivo portátil puede ser un dispositivo montado en un dedo o guante.

Además, el dispositivo puede comprender un transmisor inalámbrico y se puede disponer para transmitir datos de manera inalámbrica, por ejemplo, para su recepción por un ordenador para procesar los datos.

25 La etapa de dirigir la radiación electromagnética puede comprender generar una señal oscilante de la radiación electromagnética. Generar la señal oscilante puede comprender aplicar una oscilación o vibración al espejo y/o la capa sensora.

El dispositivo puede comprender además controladores de polarización y filtros de polarización para controlar un estado de polarización de la primera señal y de la segunda señal.

30 Detectar una intensidad de una señal de interferencia resultante puede comprender detectar las intensidades respectivas asociadas con al menos dos polarizaciones.

El detector puede comprender un divisor de haz polarizador dispuesto para dividir una señal óptica indicativa de la radiación electromagnética detectada en al menos dos señales con las respectivas polarizaciones.

35 El detector puede comprender además las respectivas porciones del detector para la detección independiente de al menos dos señales con las respectivas polarizaciones.

El método puede comprender analizar las intensidades de luz detectadas con las respectivas polarizaciones de una manera tal que se pueda determinar un cambio en el espesor de la capa sensora al menos en gran medida independiente del ángulo de inclinación entre una longitud del camino óptico y una orientación relativa de la capa sensora y/o una condición de enfoque de la señal en la capa sensora.

40 Alternativamente, detectar una intensidad de una señal de interferencia resultante puede comprender detectar un promedio temporal de las respectivas intensidades asociadas con las respectivas señales de interferencia con respectivos contenidos de fase.

En una realización adicional, determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material comprende determinar una deformación del material como resultado de la carga adecuada aplicada.

45 En un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona una disposición para evaluar una propiedad mecánica de un material, que comprende un dispositivo portátil y un ordenador, comprendiendo la disposición:

una capa sensora con un espesor, una superficie sensora expuesta y una superficie opuesta, siendo la capa sensora deformable de manera que, cuando la superficie sensora está en contacto directo o indirecto con el material y se aplica una carga adecuada a través de tanto la capa sensora como de al menos una parte del material, se deforma la capa sensora y la superficie sensora se mueve con respecto a la superficie opuesta;

50

una fuente de radiación electromagnética en comunicación óptica con la capa sensora, disponiéndose la fuente para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que es del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa sensora o más larga que el espesor de la capa sensora; y

5 un detector para detectar la radiación electromagnética y que está en comunicación óptica con la capa sensora, disponiéndose el detector para detectar la radiación electromagnética reflejada en la interfaz en la superficie sensora de la capa sensora;

en donde el dispositivo comprende:

una primera longitud del camino óptico en uso que proporciona una primera señal, siendo la primera señal una señal que se refleja en la superficie sensora de la capa sensora; y

10 una segunda longitud del camino óptico en uso que proporciona una segunda señal; y

en donde el detector se coloca para detectar tanto la primera señal como la segunda señal, por lo que el detector detecta en uso una intensidad asociada con una señal de interferencia; y

en donde el ordenador se adapta para determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material (102) a partir de la intensidad de la señal de interferencia.

15 El dispositivo portátil puede ser un dispositivo montado en un dedo o guante.

El dispositivo puede comprender un transmisor inalámbrico y se puede disponer para transmitir datos de manera inalámbrica, por ejemplo, para su recepción por un ordenador para procesar los datos.

20 La capa sensora puede tener un espesor que varía de unos pocos micrómetros a unos pocos centímetros, tal como de 10  $\mu\text{m}$  a 3 cm cuando no está comprimida, y en consecuencia la superficie sensora y la superficie opuesta pueden estar separadas entre sí por una distancia que varía de unos pocos micrómetros a unos pocos centímetros, tal como de 10  $\mu\text{m}$  a 3 cm cuando la capa sensora no está comprimida.

La capa sensora puede comprender, o se puede formar a partir de, un material deformable translúcido o transparente tal como un gel o un elastómero.

La capa sensora puede ser una funda quirúrgica que comprende un material plástico.

25 La fuente de radiación electromagnética se puede configurar para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que proporcione una señal de interferencia para un intervalo de diferentes espesores de la capa sensora sin ajustar la longitud del segundo camino óptico.

30 La fuente de la fuente electromagnética puede tener una longitud de coherencia que varía del espesor de la capa sensora a una longitud que corresponde a un múltiplo del espesor de la capa sensora. Por ejemplo, la fuente de radiación electromagnética puede tener una longitud de coherencia mayor de 30, 50, 70, 100 o 200  $\mu\text{m}$ .

35 El espesor de la capa sensora sin comprimir y la longitud de coherencia de la fuente usada normalmente se eligen de manera que se pueda detectar una variación en la intensidad de la señal de interferencia al aplicar una carga adecuada a través de la capa sensora. Se puede usar una capa sensora con un espesor relativamente pequeño tal como 10  $\mu\text{m}$  y una fuente de luz con una correspondiente longitud de coherencia relativamente corta (similar a la longitud de coherencia de la fuente de luz de banda ancha usada en OCT). Sin embargo, si la capa sensora es más gruesa y puede tener, por ejemplo, un espesor de unos pocos centímetros, se puede usar una fuente de luz con una correspondiente longitud de coherencia más larga.

40 La superficie opuesta de la capa sensora puede ser una superficie estacionaria que es estacionaria con respecto a una parte de la carcasa del dispositivo cuando se aplica la carga adecuada a través de tanto la capa sensora como de al menos una parte del material. Alternativamente, la superficie opuesta de la capa sensora se puede mover o hacer vibrar de una manera conocida.

La segunda longitud del camino óptico puede comprender una interfaz en la superficie opuesta de la capa sensora mediante la cual la segunda longitud del camino óptico se dispone para generar la segunda señal reflejando la radiación electromagnética en la interfaz en la superficie opuesta.

45 Alternativamente, la segunda longitud del camino óptico puede comprender un espejo y se puede configurar para generar la segunda señal reflejando la radiación electromagnética en el espejo, que puede ser estacionario con respecto a una parte de la carcasa del dispositivo. Alternativamente, el espejo se puede mover o hacer vibrar de una manera conocida.

50 El dispositivo puede comprender además un espejo de escaneo para escanear la primera señal a través de la superficie sensora de la capa sensora de manera que se pueda obtener una imagen o mapa de la superficie sensora.

En una realización, el dispositivo comprende un elemento de oscilación o vibración colocado en el espejo y/o en la capa sensora para generar una señal de radiación electromagnética oscilante.

El dispositivo puede comprender además controladores de polarización y filtros de polarización para controlar un estado de polarización de la primera señal y de la segunda señal.

- 5 La segunda señal puede estar polarizada linealmente. La primera señal puede estar polarizada circularmente.

El detector puede comprender un divisor de haz polarizador dispuesto para dividir una señal óptica indicativa de la primera señal y de la segunda señal detectadas en al menos dos señales con respectivas polarizaciones.

El detector puede comprender respectivas partes detectoras para la detección independiente de las al menos dos señales con las respectivas polarizaciones.

- 10 La invención se entenderá más completamente a partir de la siguiente descripción de las realizaciones específicas de la invención. La descripción se proporciona con referencia a los dibujos adjuntos.

### **Breve descripción de los dibujos**

15 Sin perjuicio de cualquier otra forma que pueda caer dentro del alcance de la descripción tal como se establece en el Sumario, ahora se describirán realizaciones específicas, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

La Figura 1 es una representación esquemática de un dispositivo para evaluar una propiedad mecánica de un material según una realización de la presente invención;

La Figura 2 es una representación esquemática de un dispositivo para evaluar una propiedad mecánica de un material según otra realización de la presente invención;

- 20 La Figura 3a es un diagrama que ilustra un método conocido para evaluar una propiedad mecánica de un material usando Tomografía de Coherencia Óptica;

La Figura 3b es un diagrama que ilustra un método para evaluar una propiedad mecánica según realizaciones de la presente invención;

- 25 La Figura 4 es una representación esquemática de un dispositivo para evaluar una propiedad mecánica de un material según otra realización de la presente invención;

La Figura 5a es una imagen de un material obtenida usando un método y un dispositivo según una realización de la presente invención;

La Figura 5b es una imagen de un material obtenida mediante OCT;

La Figura 6 es un diagrama de flujo de un método según una realización de la presente invención;

- 30 La Figura 7 (a) y (b) son un gráfico de magnitud y fase, respectivamente, de un componente de intensidad detectado usando un método y un dispositivo según una realización de la presente invención;

La Figura 8a es una representación esquemática de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según una realización adicional de la presente invención;

- 35 La Figura 8b es una representación esquemática de un detector de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según la realización de la presente invención ilustrada en la Figura 8a;

La Figura 9a es una representación esquemática de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según una realización adicional de la presente invención;

La Figura 9b es una representación esquemática de un detector de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según la realización de la presente invención ilustrada en la Figura 9a;

- 40 La Figura 10 es una representación esquemática de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según una realización alternativa de la presente invención; y

La Figura 11 es una representación esquemática de un sistema usado para evaluar una propiedad mecánica de un material según otra realización de la presente invención.

### **Descripción detallada de realizaciones específicas**

- 45 Las realizaciones de la presente invención se refieren a un método y a un dispositivo portátil para realizar una medición de palpación óptica de un material. El experto en la técnica apreciará que el material puede adoptar cualquier forma

adecuada. Por ejemplo, el material puede ser un material inorgánico u orgánico. El material también puede ser tejido biológico, tal como tejido biológico ex vivo o in vivo.

La palpación óptica es una técnica que se puede usar para mapear la tensión superficial del material y ayudar a distinguir entre diferentes tipos de tejido, tal como tejido canceroso y tejido sano, generalmente más blando. En la palpación óptica, se aplica una carga de compresión a una capa sensora, que se coloca contra el material. La capa sensora se comprime y se deforma bajo la aplicación de la carga de compresión, por lo que el espesor de la capa sensora cambia en respuesta a la rigidez local del material subyacente. Luego se usa OCT para obtener imágenes del cambio del espesor a través de la capa sensora deformada, lo que representa una distribución o mapa de la tensión. Esto requiere un escaneo en profundidad (o un corte en profundidad) de todo el espesor de la capa sensora.

Sin embargo, mientras que la OCT explora todo el espesor de la capa sensora, la técnica de palpación óptica sólo requiere conocimiento del espesor inicial de la capa sensora (antes de aplicar la carga) e información sobre un cambio en la posición relativa de la interfaz entre la capa sensora y el material en respuesta a la aplicación de la carga. Como consecuencia, no es necesario escanear todo el espesor de la capa sensora. Además, dependiendo del espesor inicial de la capa sensora antes de aplicar la carga, puede que no haya necesidad de una fuente de luz de banda ancha. Se puede usar una fuente de luz de banda más estrecha y simple (tal como un LED) con una longitud de coherencia más larga y un dispositivo para evaluar la propiedad mecánica del material que use sólo una técnica de palpación óptica puede ser relativamente económico y más simple en comparación con un sistema OCT. Además, el dispositivo puede ser más pequeño y el tiempo de detección se puede reducir en comparación con el tiempo de detección cuando se usa un sistema OCT.

Según realizaciones de la presente invención, se describe un método y un dispositivo portátil para evaluar una propiedad mecánica de un material. La propiedad mecánica se relaciona con la elasticidad o rigidez del material. Específicamente, la elasticidad se puede relacionar con el módulo de Young del material, y el módulo de Young es representativo de la rigidez del material. En el campo de la medicina (por ejemplo), se sabe que anomalías tales como un tejido enfermo pueden alterar la elasticidad del tejido biológico. Por ejemplo, el tejido canceroso suele ser "más rígido" que el tejido blando sano circundante. Sin embargo, se entenderá que se pueden evaluar otras propiedades mecánicas tales como viscoelasticidad, anisotropía y poroelasticidad.

Con referencia ahora a la Figura 1, se muestra un dispositivo portátil 100 para evaluar la elasticidad de un material 102 según una realización de la presente invención. Cabe señalar que el dispositivo portátil 100 es en esta realización específica en la forma de un dispositivo portátil; sin embargo, se prevé que el dispositivo portátil sea en la forma de un dispositivo montado en un dedo o guante.

El dispositivo portátil 100 comprende una capa sensora 104 con una superficie sensora expuesta 106 que en este ejemplo se coloca en contacto directo con el material 102. La capa sensora 104 tiene una superficie 108 que está opuesta a la superficie sensora 106. La capa sensora 104 es deformable y comprende, en la presente realización, un material de silicona. Sin embargo, se apreciará que la capa sensora 104 también puede comprender, alternativamente, cualquier material deformable translúcido o transparente tal como un gel o un elastómero. También se apreciará que se prevé que cuando se usa durante la cirugía, la capa sensora 104 puede ser alternativamente una funda quirúrgica que comprende un material plástico y que se usa para cubrir el dispositivo 100. El dispositivo 100 comprende además una fuente 112 de radiación electromagnética y un detector 114 para detectar radiación electromagnética. Tanto la fuente 112 como el detector 114 están en comunicación óptica con la capa sensora 104, por medio de fibras ópticas 116, 118 y 120. En esta realización, el dispositivo también comprende un transmisor inalámbrico 122 para transmitir datos de manera inalámbrica hacia un ordenador 124 con el que se pueden procesar los datos. La capa sensora 104 tiene en esta realización específica un espesor de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, se entenderá que la capa sensora 104 puede tener cualquier otro espesor adecuado. Por ejemplo, la capa sensora 104 puede tener un espesor en el intervalo de 10  $\mu\text{m}$  a 3 cm.

En otra realización, la superficie sensora 106 de la capa sensora 104 está en contacto indirecto con el material 102. Por ejemplo, se puede colocar una capa delgada que comprende látex u otro material plástico, tal como una funda quirúrgica, entre la superficie sensora 106 y el material 102 para evitar la contaminación del material.

En este ejemplo, la fuente 112 emite radiación electromagnética con una longitud de onda de aproximadamente 1300 nanómetros y con un ancho de banda de 15 nanómetros y una longitud de coherencia de aproximadamente 50 micrómetros. Sin embargo, se prevé que la longitud de coherencia de la fuente 112 esté en el intervalo de 5 micrómetros a unos pocos milímetros y hasta varios centímetros.

El dispositivo 100 tiene una longitud del camino óptico de la muestra 126, que proporciona una señal de muestra. La señal de muestra se refleja en una interfaz 128 entre la superficie sensora 106 y el material 102. El dispositivo 100 también tiene una longitud del camino óptico de referencia 130 en la que la radiación electromagnética se dirige a un espejo de referencia 133, que en esta realización es estacionario con respecto a la parte de alojamiento 110 del dispositivo 100. La longitud del camino óptico de referencia 130 proporciona una señal de referencia. La radiación electromagnética que se propaga a lo largo del camino de la muestra 126 y la que se propaga a lo largo del camino de referencia 130 se enfoca mediante las lentes 134 y 138, respectivamente.

La radiación electromagnética emitida por la fuente 112 se distribuye entre la longitud del camino óptico de la muestra 126 y la longitud del camino óptico de referencia 130 mediante el divisor de haz óptico 132. Se permite que la radiación electromagnética reflejada (tanto la de la muestra como la de referencia) interfiera y se detecte por el detector 114. Se aplica una carga a través de la capa sensora 104 y de una parte del material 102, por lo que se deforma la capa sensora 104, y la superficie sensora 106 se mueve con respecto a la superficie opuesta 108. El espesor de la capa sensora comprimida 104 se puede determinar basándose en la intensidad detectada de la interferencia por el detector 114.

Si se conoce el espesor inicial de la capa sensora (no comprimida) 104, entonces se puede determinar el cambio en el espesor. Alternativamente, el espesor inicial de la capa sensora 104 se puede determinar de manera análoga. Es importante destacar que, como la superficie opuesta 108 de la capa sensora 104 y el espejo de referencia 136 son estacionarios en esta realización (con respecto a una parte de la carcasa del dispositivo), la señal de referencia es constante y el dispositivo 100 permite obtener información relativa al cambio del espesor de la capa sensora 104 en respuesta a una carga aplicada analizando las intensidades de interferencia detectadas. Esto contrasta con un sistema OCT, para el cual se requiere una sección profunda de todo el espesor de la capa sensora para obtener información con respecto al espesor de la capa sensora 104. La longitud de coherencia de la fuente 112 y el espesor inicial de la capa sensora 104 se eligen típicamente en realizaciones de la presente invención de manera que se pueda detectar una variación en la intensidad de la radiación electromagnética recibida en el detector 114 tras la aplicación de la carga adecuada a través de la capa sensora 104.

En la presente realización ilustrada en la Figura 1, el dispositivo 100 comprende además un convertidor analógico a digital 140 para digitalizar una salida del detector 114 y un transmisor inalámbrico 122 para transmitir datos desde el dispositivo 100 a un ordenador 124.

La Figura 2 muestra un dispositivo 150 según una realización alternativa de la presente invención y los componentes similares se representan por números de referencia similares. La longitud del camino óptico de referencia proporciona en esta realización una señal de referencia que se refleja en la superficie opuesta 108 de la capa sensora 104.

Como se mencionó anteriormente, la intensidad de la señal de interferencia detectada como función del cambio en la diferencia de la longitud del camino óptico entre la señal de la muestra y la señal de referencia se puede considerar como una función gaussiana. En consecuencia, existe una relación entre la intensidad de la interferencia detectada y la posición de la interfaz 128, que se puede usar para medir el cambio en el espesor de la capa sensora 104 como resultado de la carga aplicada sin la necesidad de un aparato de corte en profundidad tal como un aparato OCT.

Con referencia ahora a la Figura 3a, ahora se ilustra el principio conocido para determinar una propiedad mecánica del material o de un material biológico usando palpación óptica mediante OCT antes de ilustrar el método según las realizaciones de la presente invención. Se usa una fuente de luz de banda ancha con una longitud de coherencia relativamente corta y la luz emitida se dirige hacia y a través de la capa sensora 104, como se ilustra con la flecha "EM". El espesor de la capa sensora 104 se mide antes de la compresión como se ilustra por la capa sensora 104bc. La gráfica  $g_{bc}$  muestra las mediciones de la intensidad (i) de una señal de interferencia detectada en función de la profundidad (d). Esto comprende la profundidad que secciona todo el espesor de la capa sensora 104bc (la gráfica  $g_{bc}$  sólo ilustra las intensidades de interferencia correspondientes a las interfaces de la capa). Luego se mide el espesor de la capa sensora 104 después de la compresión como se ilustra en la capa sensora 104ac y el gráfico  $g_{ac}$  muestra las correspondientes intensidades de interferencia. Nuevamente, esto comprende la profundidad que secciona todo el espesor de la capa 104ac.

La Figura 3b ilustra el principio de determinar una propiedad mecánica, tal como la elasticidad, de un material usando el dispositivo y método según realizaciones de la presente invención. Se usa una fuente de luz de banda relativamente estrecha con una longitud de coherencia relativamente larga. Sólo se requiere una medición si se conoce el espesor inicial de la capa sensora. La señal de interferencia detectada de la interfaz 128 antes de la aplicación de una carga y de la compresión de la capa sensora 104 (ver Figura 3b, capa 104bc) parece tener una intensidad correspondiente al máximo de la función gaussiana  $g_{bc}$ . La señal de interferencia detectada de la interfaz 128 después de la aplicación de una carga y de la compresión de la capa sensora 104 (ver Figura 3b, capa 104ac) tiene una intensidad (i) a lo largo de la función gaussiana que ha disminuido en comparación con la intensidad detectada antes de la compresión. Esto es indicativo de que la diferencia entre la longitud del camino óptico de la muestra 126 y la longitud del camino óptico de referencia 130 ha cambiado (y las condiciones de interferencia han cambiado indicando el cambio en el espesor de la capa) en respuesta a la carga aplicada. La Figura 4 ilustra un dispositivo 170 usado para obtener una imagen o mapa de palpación óptica según una realización de la presente invención. Se usa un espejo de escaneo 146 para escanear la señal de la muestra a través de la superficie sensora 106 de la capa sensora 104 de manera que se pueda obtener una imagen de palpación óptica o un mapa de la superficie sensora 106. El espejo de escaneo 146 puede ser un espejo MEMS (por sus siglas en inglés, Sistema Micro Electromecánico) o un espejo galvanométrico.

También se entenderá que, alternativamente, se prevé usar una fibra óptica vibratoria o giratoria como fibra óptica 116 para dirigir la radiación electromagnética hacia la superficie sensora 106 y para escanear la señal de la muestra a través de la superficie sensora 106 de la capa sensora 104 de manera que se pueda obtener una imagen de palpación óptica o un mapa de la superficie sensora 106.

5 En otra realización alternativa, se prevé que se use un haz de fibras ópticas 116 para dirigir la radiación electromagnética hacia la superficie sensora 106 y para obtener una imagen o mapa de palpación óptica de la superficie sensora 106, en donde cada píxel de la imagen obtenida se corresponde a la información indicativa de la radiación electromagnética reflejada en la superficie sensora 106 y recibida por una respectiva fibra óptica 116 del haz.

La Figura 5a muestra una imagen de palpación óptica 500 del tejido 502 obtenida usando un dispositivo tal como el dispositivo 170 descrito anteriormente. En este caso el material es tejido biológico que incluye un tumor. Es claramente identificable una ubicación del tumor 504 (que es más rígido que el tejido sano) dentro del tejido biológico sano.

10 A modo de comparación, la Figura 5b muestra una imagen de palpación óptica 550 obtenida usando una técnica de obtención de imágenes OCT. La Figura 5b muestra la misma región de tejido biológico 552 que la Figura 5a y también identifica el tumor 554.

La Figura 6 muestra un diagrama de flujo de un método 600 para evaluar una propiedad mecánica de un material o material biológico según una realización de la presente invención.

15 El método 600 comprende el paso 602, que proporciona el material 102. El paso 604 proporciona un dispositivo portátil 100.

La capa sensora 104 del dispositivo 100 se coloca con respecto al material 102 de manera que la superficie sensora 106 esté en contacto con el material 102.

El paso 606 aplica una carga adecuada a través tanto de la capa sensora 104 como de una parte del material subyacente 102.

20 El paso 608 dirige la radiación electromagnética a lo largo de un camino de la muestra desde la fuente 112 a través de la capa sensora 104 hasta la interfaz 128 entre la superficie sensora 106 y el material de manera que una parte de la radiación electromagnética se refleje en la interfaz (ver Figuras 1 y 2). El paso 608 también dirige la radiación electromagnética emitida por la fuente 112 a lo largo de un camino de referencia 130 para generar una señal de referencia (ver las Figuras 1 y 2).

25 El paso 610 permite que la señal de la muestra y la señal de referencia interfieran. Luego se detecta una señal de interferencia resultante usando el detector 114.

30 El paso 612 obtiene la información relativa a la propiedad mecánica del material 102, tal como la elasticidad del material 102, a partir de la intensidad detectada de la señal de interferencia. En una realización, el dispositivo 100 comprende un convertidor analógico a digital 140 para convertir una salida del detector 114 en datos digitales y un transmisor 142 para la transmisión inalámbrica de los datos digitales desde el dispositivo 100 a un ordenador 124, donde se pueden procesar los datos. Los datos se procesan para determinar un cambio en el espesor de la capa sensora 104 como consecuencia de la compresión mediante la aplicación de la carga adecuada. La información relativa a la propiedad mecánica del material 102 se deriva entonces de la determinación del cambio en el espesor de la capa sensora 104. Por ejemplo, se puede determinar una tensión experimentada por la capa sensora 104 como resultado de la aplicación de la carga adecuada, cuya tensión es indicativa de la elasticidad del material 102.

35 A continuación se discutirán más detalles sobre el análisis de las intensidades de interferencia detectadas.

La relación entre la intensidad de la señal detectada por el detector 114 y el espesor de la capa sensora 104 se define como sigue:

$$I_D = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \Re\{\gamma(\tau)\},$$

40 donde  $I_D$  es la intensidad de la señal detectada en el detector 114,  $I_R$  es la intensidad de la señal de referencia,  $I_S$  es la intensidad de la señal de la muestra, y  $2\sqrt{I_S I_R} \Re\{\gamma(\tau)\}$  es el componente de la señal de interferencia entre la señal de la muestra y la señal de referencia. El componente  $\Re$  es la parte real de la función de coherencia compleja  $\gamma(\tau)$ , donde:

$$\gamma(\tau) = \exp\left\{-\left(\frac{\pi\Delta f\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \exp\{-i2\pi f\tau\},$$

45 en donde  $\exp\{-i2\pi f\tau\} = \cos(2\pi f\tau) + i \sin(2\pi f\tau)$

y  $\tau$  es el retardo de tiempo entre las señales de referencia y de la muestra detectadas debido a la diferencia en sus relativas longitudes de camino es decir,  $\tau = \Delta L/c$ , siendo  $\Delta L$  el espesor de la capa sensora 104.

Por lo tanto,  $\Delta L$  se puede medir y calcular a partir de la  $I_D$  detectada.

Midiendo la intensidad  $I_D$  antes y después de la aplicación de la carga adecuada, se puede medir un cambio en el espesor  $\Delta L$  de la capa sensora 104. El cambio en el espesor  $\Delta L$  de la capa sensora 104 se puede usar entonces para determinar la tensión experimentada por la capa sensora 104. Para determinar la tensión experimentada en la capa sensora 104, la deformación  $\varepsilon$  experimentada por la capa sensora 104 como resultado de la aplicación de la carga adecuada se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L(x, y) - \Delta L_0(x, y)}{\Delta L_0(x, y)}$$

en donde  $\varepsilon$  se refiere a la deformación de la capa sensora 104,  $\Delta L_0$  se refiere al espesor inicial de la capa sensora 104 antes de la aplicación de la carga adecuada,  $\Delta L$  se refiere al cambio en el espesor de la capa sensora 104 debido a la aplicación de la carga adecuada, y  $(x, y)$  se refiere a una posición lateral a través de un área de la capa sensora 104.

Luego, la tensión experimentada por la capa sensora 104 se determina basándose en la deformación medida y en una curva tensión-deformación conocida del material de la capa sensora 104. La tensión determinada es indicativa de la elasticidad del material.

El detector 114 es, en este ejemplo, un fotodetector y detecta el componente real de la función de coherencia compleja. La intensidad detectada por el detector 114 se define como sigue:

$$I_D = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \cos(2\pi f \tau)$$

El valor de intensidad  $I_S$  está influenciado por los siguientes factores:

1) la posición de la interfaz 128 con respecto al enfoque de la lente 134 usada para colimar la radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la longitud del camino de la muestra 126 (denominada en lo sucesivo como efecto de enfoque),

2) el ángulo de la interfaz 128 con respecto al haz óptico de radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la longitud del camino de la muestra 126 (denominado en lo sucesivo como efecto de inclinación), y

3) el contenido de fase de la señal.

La intensidad de la señal de referencia es constante porque la señal de referencia se proporciona por una longitud de camino óptico de referencia que permanece constante. A diferencia de la señal de la muestra y la señal de interferencia, la intensidad de la señal de referencia detectada no dependerá de otros factores.

A la luz de la relación entre  $I_S$  e  $I_D$ , estos factores también influyen en el valor  $I_D$ , lo que tiene consecuencias para la determinación de  $\Delta L$ .

La Figura 7 (a) muestra un gráfico 701 que representa el componente real 702 y el componente imaginario 704 de la función de coherencia compleja  $\gamma(\tau)$  (los componentes 702 y 704 son componentes oscilantes que no se resuelven en la Figura 7(a) obtenidos usando el dispositivo portátil y método según una realización de la presente invención). El eje x del gráfico 700 corresponde a  $\tau$  o  $\Delta L$ , y el eje y corresponde al valor de la intensidad de la señal de interferencia. La Figura 7(b) muestra la fase correspondiente. En este ejemplo se usa una fuente 112 con una longitud de onda central de 1300 nanómetros y un ancho de banda bajo de 15 nanómetros, correspondiente a una longitud de coherencia de aproximadamente 50 micrómetros. La envolvente 701 de los componentes trazados 702 y 704 viene dada por el

término  $\exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\}$  y suele ser una función gaussiana.

La Figura 7 (a) ilustra que el ancho de la envolvente depende del ancho de banda de la radiación electromagnética emitida por la fuente 112.

Además, como se ilustra en la Figura 7 (a), la envolvente de la intensidad detectada de la señal de interferencia cambia desde aproximadamente 0 hasta un máximo de la envolvente 701 a medida que varía la diferencia entre la longitud del camino óptico de referencia 130 y la longitud del camino óptico de la muestra 126.

Como se mencionó,  $\tau$  es el retardo de tiempo entre las señales de referencia y de la muestra detectadas debido a la diferencia en sus relativas longitudes de camino, es decir,  $\tau = \Delta L/c$ , siendo  $\Delta L$  el espesor de la capa sensora 104. En consecuencia, para determinar  $\Delta L$ , es necesario extraer el término de la amplitud del componente de interferencia de

la intensidad medida  $I_D$ , lo que corresponde al término  $2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\}$ .

A continuación, se describirá cómo se puede extraer la amplitud del componente de la interferencia o la función de coherencia compleja y, posteriormente, la información  $\Delta L$ .

Con referencia a la Figura 8a, se muestra una representación esquemática de un dispositivo portátil 800 usado para determinar  $\Delta L$  según una realización de la presente invención.

5 El dispositivo 800 comprende controladores de polarización 802 colocados a lo largo del camino óptico de la muestra 126, del camino óptico de referencia 130 y del camino 120 a lo largo del cual una suma de la señal de referencia y de la señal óptica viajan más allá del divisor de haz óptico 132 hacia el detector 114. Los controladores de polarización 802 controlan el estado de polarización de las respectivas señales. En particular, la señal óptica de referencia se polariza linealmente y la señal de la muestra se polariza circularmente.

Con referencia a la Figura 8b, el detector 114 recibe una señal óptica indicativa de la señal de referencia polarizada linealmente y de la señal de la muestra polarizada circularmente.

10 Se usa la detección de diversidad de polarización, y el detector 114 comprende un divisor de haz de polarización 804 que divide la señal óptica recibida asociada con la señal de referencia y con la señal de la muestra en dos señales con sus respectivos estados de polarización que son ortogonales entre sí. La señal de la muestra y la señal de referencia interfieren, y se obtienen dos señales de interferencia resultantes de las respectivas interferencias de la señal de la muestra y de la señal de referencia en los respectivos estados de polarización. El detector 114 comprende además dos fotodetectores  $D_1$  y  $D_2$  que detectan las respectivas intensidades asociadas con las señales de interferencia resultantes con los respectivos estados de polarización.

20 En concreto, el detector  $D_1$  detecta la radiación electromagnética que se forma por la interferencia de las señales procedentes de la longitud del camino óptico de la muestra 126 y de la longitud del camino óptico de referencia 130 con un cambio de fase de 0 grados, y el detector  $D_2$  detecta la radiación electromagnética que se forma por la interferencia de las señales procedentes de la longitud del camino óptico de la muestra 126 y de la longitud del camino óptico de referencia 130 con un cambio de fase de 90 grados. Se miden dos intensidades de señal resultantes  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$  en  $D_1$  y  $D_2$ , respectivamente:

$$I_{D1} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \cos(2\pi f \tau)$$

y

$$25 \quad I_{D2} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \sin(2\pi f \tau)$$

La normal 2 de cada uno de  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$  luego se combina para eliminar la influencia de los términos coseno y seno y, en

consecuencia, extraer el término de la amplitud de la señal de interferencia  $2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi \Delta f \tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\}$ .

30 La Figura 9a ilustra el dispositivo portátil 900 usado para determinar  $\Delta L$  según una realización alternativa de la presente invención para lo cual se usa un método de detección equilibrado, que puede permitir mejorar el comportamiento frente al ruido del dispositivo portátil 800.

35 En esta realización particular, se ubica un circulador 902 a lo largo del camino 118 entre la fuente de radiación electromagnética 112 y el divisor de haz óptico 132. Como también se puede ver más específicamente en la Figura 9b, el detector 114 recibe una señal asociada con una señal de la muestra polarizada circularmente y una señal de referencia polarizada linealmente que viajan a lo largo del camino 120, y además recibe una señal asociada con una señal de la muestra polarizada circularmente y una señal de referencia polarizada linealmente que pasan por el divisor de haz óptico 132 y viajan a lo largo del camino 118, a través del circulador 902, y se redirigen al detector 114 a lo largo del camino 904.

40 El detector 114 es un detector de diversidad de polarización y comprende dos divisores de haz de polarización 804 y 906. Cada uno de los divisores de haz de polarización 804 divide las respectivas señales recibidas por el detector 114 en dos señales con sus respectivos estados de polarización que son ortogonales entre sí. Se permite que las respectivas señales que se obtienen de los respectivos divisores de haz de polarización 804 y 906, y con los mismos estados de polarización, interfieran, y las intensidades  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$  asociadas a las mismas se detectan mediante detectores  $D_1$  y  $D_2$ .

45 Si no existe ningún efecto de inclinación, se recogerá una cantidad máxima de luz en los detectores  $D_1$  y  $D_2$ . Sin embargo, si existe un efecto de inclinación, una parte de la luz se perderá cuando se refleje en la interfaz 128. El efecto de enfoque también afectará al efecto de inclinación.

50 En consecuencia, incluso si se conoce el ángulo de la interfaz 128 con respecto al haz óptico de la radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la longitud del camino de la muestra 126, sería ventajoso corregir simultáneamente el efecto de enfoque y de inclinación mencionados anteriormente en  $I_S$  e  $I_D$ , y como resultado de la determinación de  $\Delta L$  basada en las  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$  medidas, sin tener que determinar o medir independientemente el ángulo

de la interfaz 128 con respecto al haz óptico de la radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la longitud del camino de la muestra 126, y/o de la posición de la interfaz 128 con respecto al enfoque de la lente 134 usada para colimar la radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la longitud del camino de la muestra 126.

5 En la presente realización, se usa un método de detección heterodino para extraer información sobre  $\Delta L$  que es independiente de los efectos de enfoque y de inclinación.

Como se puede ver en las Figuras 8a y 9a, se coloca un actuador 806 en el espejo de referencia 136 para inducir vibraciones en el espejo de referencia 136, dando como resultado una modulación de la señal de referencia y, en

consecuencia, también, dando como resultado una modulación del componente  $2\sqrt{I_S I_R} \Re\{\gamma(\tau)\}$  de la señal de interferencia. La modulación resultante corresponde a una modulación del componente de fase de la señal de referencia y de la señal de interferencia, como se ilustra en la Figura 8. Más específicamente, la modulación de la señal de referencia por medio del actuador 806 da como resultado una modulación portadora  $\alpha(t)$  en la señal de interferencia según las siguientes ecuaciones:

$$I_{D1} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi\Delta f\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \cos(2\pi f\tau + \alpha(t))$$

y

$$15 \quad I_{D2} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi\Delta f\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \sin(2\pi f\tau + \alpha(t))$$

En esta realización, el actuador 806 es un actuador piezoeléctrico. El experto en la técnica entenderá que se pueden usar otros medios para modular la señal de referencia, tal como por ejemplo un modulador óptico no lineal.

Usando filtros de paso alto y paso bajo 150 colocados más allá de los detectores  $D_1$  y  $D_2$ , se pueden extraer los siguientes componentes a partir de las intensidades de señal detectadas  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$ :

$$20 \quad I_{D1;DC} = I_R + I_S \quad , \quad \text{and} \quad I_{D1;AC} = 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi\Delta f\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \cos(2\pi f\tau + \alpha(t))$$

$$I_{D2;DC} = I_R + I_S \quad , \quad \text{and} \quad I_{D2;AC} = 2\sqrt{I_S I_R} \exp\left\{-\left(\frac{\pi\Delta f\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right\} \sin(2\pi f\tau + \alpha(t))$$

25 Durante un tiempo de detección que se elige para que sea mayor que la frecuencia portadora de las señales se recogen múltiples mediciones de  $I_{D1;DC}$ ,  $I_{D1;AC}$ ,  $I_{D2;DC}$  y  $I_{D2;AC}$ . Luego, los datos se calibran manual o automáticamente, lo que puede incluir un análisis de regresión o aprendizaje automático, en una medición de  $I_D$ , que depende puramente de  $\tau$  y, en consecuencia,  $\Delta L$  (independiente de los efectos de inclinación y enfoque).

30 El ángulo de la interfaz 128 con respecto al haz óptico de la radiación electromagnética que se propaga a lo largo del camino de la muestra 126 se puede medir, por ejemplo, basándose en la relación total de intensidades  $I_{D1}$  e  $I_{D2}$ . En este ejemplo, se coloca un revestimiento dieléctrico en la interfaz 128 de la capa sensora 104. El revestimiento dieléctrico influye en la reflexión del haz óptico polarizado incidente de la radiación electromagnética, dependiendo de su estado de polarización y en base al ángulo de la interfaz 128 con respecto al haz óptico de la radiación electromagnética.

35 En otro ejemplo, se pueden usar dos o más espejos de referencia vibrantes (multiplexados) a lo largo de la longitud del camino óptico de referencia, y se obtienen mediciones para las posiciones de referencia, que están dentro de la longitud de coherencia de la radiación electromagnética emitida por la fuente 112. Una diferencia relativa entre las mediciones se cancelará y, por lo tanto, el resultado será independiente del efecto de inclinación.

Con referencia ahora a la Figura 10, se muestra una representación esquemática de un dispositivo portátil 1000 usado para determinar  $\Delta L$  según otra realización de la presente invención.

40 El dispositivo portátil 1000 comprende todos los elementos del dispositivo portátil 800; sin embargo, en esta realización, se coloca adicionalmente un actuador 1002 en la superficie opuesta 106 de la capa sensora 104 para modular el contenido de fase de la señal de la muestra y por consiguiente para modular el componente de la señal de interferencia. Modulando tanto la señal de referencia como la señal de la muestra, se pueden medir variaciones muy pequeñas en  $\Delta L$ , en comparación cuando no se modula la señal de la muestra, y las variaciones en  $\Delta L$  se pueden medir de una manera sustancialmente más exacta y precisa. Más específicamente, modular tanto la señal de referencia como la señal de la muestra puede permitir lograr una sensibilidad de desplazamiento y detectar variaciones en  $\Delta L$  en el rango subnanométrico.

45 El actuador 1002, cuando se acciona, provoca una compresión de la capa sensora 104. Las Intensidades  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$ , con un desplazamiento de fase de 90 grados, se detectan en el momento  $t_1$  por los respectivos detectores  $D_1$  y  $D_2$  cuando

no se acciona el actuador 1002, y las intensidades  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$  se detectan en el momento  $t_2$  por los respectivos detectores  $D_1$  y  $D_2$  cuando se acciona el actuador 1002.

5 El accionamiento de encendido - apagado del actuador 1002 se realiza a una velocidad que es sustancialmente mucho más lenta que la velocidad a la que los detectores  $D_1$  y  $D_2$  pueden detectar la radiación electromagnética y medir intensidades, de modo que se pueden medir las correspondientes intensidades  $I_{D1}$  y  $I_{D2}$ .

El cambio en el espesor de la capa sensora 104 que se puede detectar es normalmente menor que la mitad de la longitud de onda de la radiación electromagnética emitida por la fuente 112, y se puede identificar según la siguiente ecuación:

$$\delta L = \frac{\lambda_o \left[ \tan^{-1} \left( \frac{I_{D2;AC;t2}}{I_{D1;AC;t2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{I_{D2;AC;t1}}{I_{D1;AC;t1}} \right) \right]}{4\pi n}$$

10 donde  $\lambda_o$  es la longitud de onda central de la radiación electromagnética emitida por la fuente 112, y  $n$  es el índice de refracción del sensor. Los valores de  $I_{D1;AC}$  e  $I_{D2;CA}$  se obtienen usando el método presentado anteriormente usando la detección de la diversidad de polarización, la detección heterodina y filtrando las señales con filtros de paso alto y paso bajo.

15 La Figura 11 ilustra además un dispositivo portátil 1100 según otra realización alternativa en donde el dispositivo portátil 1100 no comprende controladores de polarización. En esta realización, el actuador 806 se coloca en el espejo de referencia 136 para inducir vibraciones en el espejo de referencia 136 a una amplitud que es unas pocas veces mayor que la longitud de onda de la radiación electromagnética emitida por la fuente 112. Como resultado, el contenido

20 de fase del componente de la señal de interferencia  $2\sqrt{I_S I_R} \Re\{\gamma(\tau)\}$  se modula por múltiplos de  $2\pi$ . El detector 114 comprende un único fotodetector  $D_1$  que detecta intensidades asociadas con las respectivas señales de interferencia resultantes durante un período de tiempo de detección. A continuación, se determina una media de las intensidades detectadas durante el período de tiempo de detección, a partir de lo cual se puede extraer el valor de  $\tau$  y, en consecuencia,  $\Delta L$ .

25 La propiedad mecánica del material 102, tal como la elasticidad, se puede determinar además cuantitativamente calculando el módulo de Young, una relación entre la tensión determinada experimentada por la capa sensora 104 y una deformación determinada experimentada por el material 102. En esta realización, el módulo de Young  $E$  del material 102 se determina como sigue:

$$E = \frac{\sigma_{\text{Capa sensora 104}}}{\epsilon_{\text{Tejido biológico 102}}}$$

30 En donde  $E$  se refiere al módulo de Young del material 102,  $\sigma_{\text{Capa sensora 104}}$  se refiere a la tensión determinada experimentada por la capa sensora 104, y  $\epsilon_{\text{Material 102}}$  se refiere a la deformación distribuida dentro del material 102 en respuesta a la aplicación de la carga adecuada.

La deformación distribuida dentro del material 102 como resultado de la aplicación de la carga adecuada se puede determinar midiendo un desplazamiento relativo del material 102 como resultado de la aplicación de la carga adecuada. Esto se puede realizar reposicionando la lente 134 para enfocar la radiación electromagnética dirigida a lo largo de la longitud del camino óptico de la muestra 126 en el material 102.

35 Se determina que las modificaciones y variaciones que serían evidentes para un destinatario experto están dentro del alcance de la presente invención.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para evaluar una propiedad mecánica de un material (102), comprendiendo el método:  
proporcionar el material (102);  
proporcionar un dispositivo (100, 150, 170) para evaluar la propiedad mecánica del material, comprendiendo el dispositivo (100, 150, 170):  
una capa sensora (104) con un espesor, una superficie sensora (106) y una superficie opuesta (108), siendo la capa sensora (104) deformable de tal manera que, cuando la superficie sensora (106) está en contacto directo o indirecto con la material (102) y se aplica una carga adecuada a través de tanto la capa sensora (104) como de al menos una parte del material (102), se deforma la capa sensora (104) y la superficie sensora (106) se mueve con respecto a la superficie opuesta (108);  
una fuente de radiación electromagnética (112) en comunicación óptica con la capa sensora (104), disponiéndose la fuente (112) para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que es del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa sensora (104) o más larga que el espesor de la capa sensora (104); y  
un detector (114) para detectar la radiación electromagnética y que está en comunicación óptica con la capa sensora (104) y dispuesto para recibir la radiación electromagnética después de que la radiación electromagnética se refleje en la interfaz en la superficie sensora (106) de la capa sensora (104);  
el método comprende además:  
colocar la capa sensora (104) con respecto al material (102) de manera que la superficie sensora (106) esté en contacto directo o indirecto con el material (102);  
aplicar la carga adecuada a través de tanto la capa sensora (104) como de al menos una parte del material (102), por lo que se deforma la capa sensora (104) y la interfaz en la superficie sensora (106) se mueve con respecto a una condición en la que no se aplica carga;  
dirigir la radiación electromagnética a la interfaz en la superficie sensora (106) de modo que al menos una parte de la radiación electromagnética se refleje en la interfaz en la que se genera una primera señal;  
dirigir la radiación electromagnética a lo largo de un segundo camino óptico para generar una segunda señal;  
permitir que la primera señal y la segunda señal interfieran y detectar una intensidad asociada con una señal de interferencia resultante usando el detector (104); y  
determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material (102) a partir de la intensidad detectada de la señal de interferencia.
2. El método de la reivindicación 1, en donde determinar la información relativa a la propiedad mecánica comprende determinar una posición relativa de la interfaz en la superficie sensora (106), fijándose la longitud del segundo camino óptico antes de la aplicación de la carga y sin que sea necesaria variación en la longitud del segundo camino óptico para medir una distancia que un límite de capa externa o un límite interno se ha movido debido a la aplicación de la carga adecuada.
3. El método de la reivindicación 1 o 2, en donde la etapa de dirigir la radiación electromagnética a la interfaz en la superficie sensora (106) comprende dirigir la radiación electromagnética hacia y a través de la capa sensora (104) hasta la superficie sensora (106).
4. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende determinar un cambio en el espesor de la capa sensora (104), teniendo la capa sensora (104) un espesor relajado conocido predeterminado que es el espesor que la capa sensora (104) tiene cuando no hay carga aplicada, determinándose el cambio en el espesor de la capa sensora (104) usando el espesor relajado conocido y un cambio en la posición relativa de la interfaz en la superficie sensora (106) como consecuencia de la deformación cuando se aplica la carga.
5. El método de la reivindicación 4, en donde la etapa de determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material (102) comprende determinar el cambio en el espesor de la capa sensora (104) a partir de la intensidad detectada de la señal de interferencia y determinar la propiedad mecánica del material (102) a partir del cambio determinado en el espesor de la capa sensora (104).
6. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende determinar el cambio de espesor de la capa sensora (104) a partir de una única señal de interferencia.
7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende determinar el cambio de espesor de la capa sensora (104) a partir de dos señales de interferencia.

8. El método de una cualquiera de la reivindicación 7, en donde las dos señales de interferencia se generan mediante reflexiones en las interfaces superior e inferior de la capa sensora (104).
- 5 9. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material (102) comprende determinar un cambio en una diferencia de la longitud del camino óptico entre la primera señal y la segunda señal a partir de una intensidad medida de la señal de interferencia detectada en respuesta a la carga adecuada aplicada a la capa sensora (104) y al material (102).
10. El método de la reivindicación 9, en donde determinar la información relativa a la propiedad mecánica comprende determinar la información a partir del cambio determinado en la diferencia de la longitud del camino óptico.
- 10 11. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la propiedad mecánica es la elasticidad o la viscoelasticidad y determinar la información relativa a la propiedad mecánica comprende determinar una tensión experimentada por la capa sensora (104) basándose en el cambio determinado en la diferencia de la longitud del camino óptico.
- 15 12. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la fuente de la radiación electromagnética se dispone para generar una radiación electromagnética con una longitud de coherencia que proporciona una señal de interferencia para un intervalo de diferentes espesores de la capa sensora (104) sin ajustar la longitud del segundo camino óptico.
13. Una disposición para evaluar una propiedad mecánica de un material, que comprende un dispositivo portátil (800) y un ordenador, comprendiendo la disposición:
- 20 una capa sensora (104) con un espesor, una superficie sensora expuesta (106) y una superficie opuesta (108), siendo la capa sensora (104) deformable de manera que, cuando la superficie sensora (106) está en contacto directo o indirecto con el material (104) y se aplica una carga adecuada a través de la capa sensora (104) y de al menos una parte del material (102), se deforma la capa sensora (104) y la superficie sensora (106) se mueve con respecto a la superficie opuesta (108);
- 25 una fuente de radiación electromagnética (112) en comunicación óptica con la capa sensora (104), disponiéndose la fuente (112) para generar radiación electromagnética con una longitud de coherencia que es del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa sensora (104) o más larga que el espesor de la capa sensora (104); y
- un detector (114) para detectar la radiación electromagnética y que está en comunicación óptica con la capa sensora (104) y que se dispone para detectar la radiación electromagnética reflejada en la interfaz en la superficie sensora (106) de la capa sensora (104);
- 30 en donde el dispositivo comprende:
- una primera longitud del camino óptico en uso que proporciona una primera señal, siendo la primera señal una señal que se refleja en la superficie sensora (106) de la capa sensora (104); y
- una segunda longitud del camino óptico en uso que proporciona una segunda señal; y
- 35 en donde el detector (114) se adapta para colocarse para detectar tanto la primera señal como la segunda señal, por lo que el detector (114) detecta en uso una intensidad asociada con una señal de interferencia; y
- en donde el ordenador se adapta para determinar la información relativa a la propiedad mecánica del material (102) a partir de la intensidad de la señal de interferencia.
- 40 14. La disposición de la reivindicación 13, en donde la capa sensora (104) tiene un espesor que varía de unos pocos micrómetros a unos pocos centímetros cuando no está comprimida, estando la superficie sensora (106) y la superficie opuesta (108) (o la superficie estacionaria) separadas entre sí por una distancia de unos pocos micrómetros a unos pocos centímetros cuando la capa sensora (104) está descomprimida.
15. La disposición de una cualquiera de las reivindicaciones 13 o 14, en donde la capa sensora (104) comprende, o se forma a partir de, un material deformable translúcido o transparente tal como un gel o un elastómero.

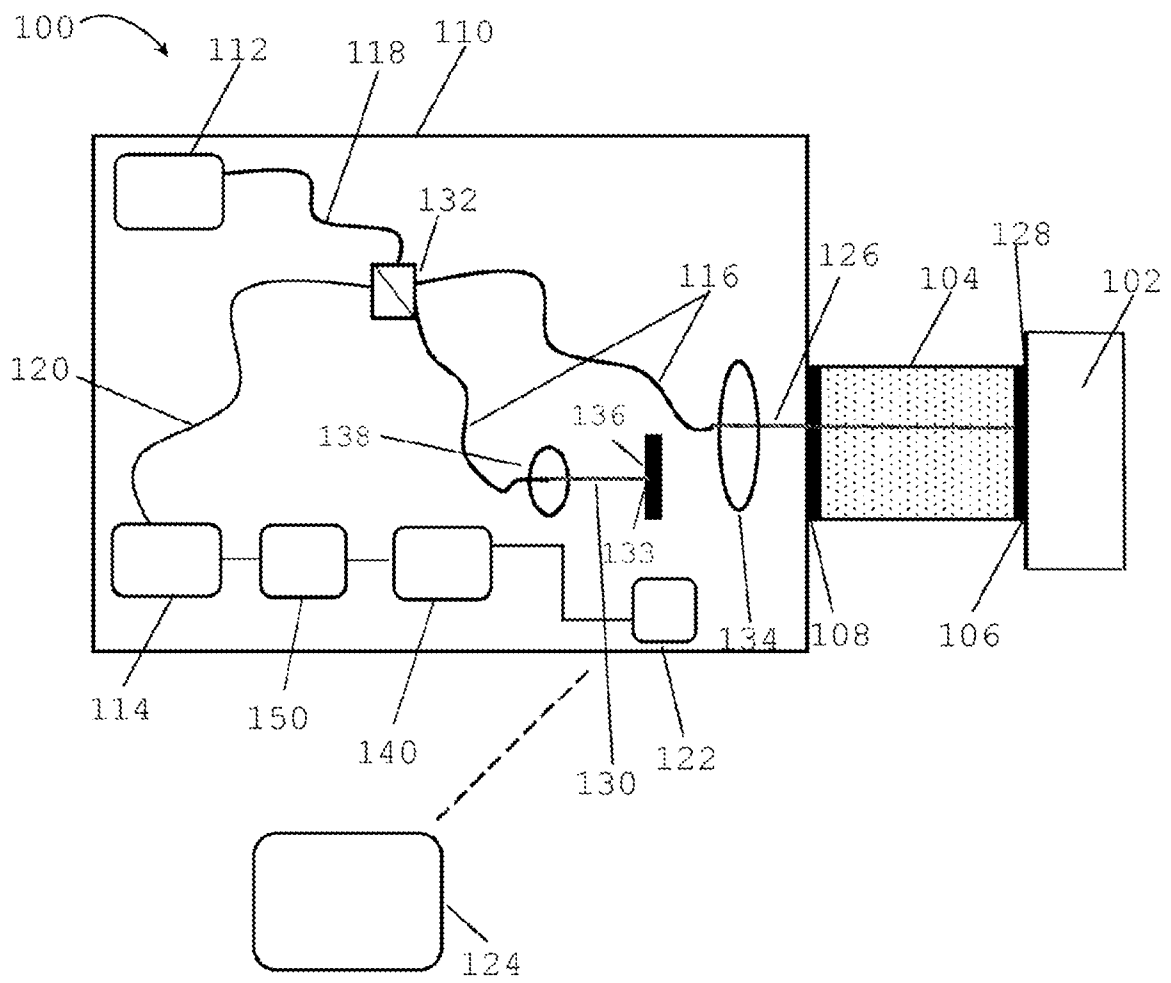


Figura 1

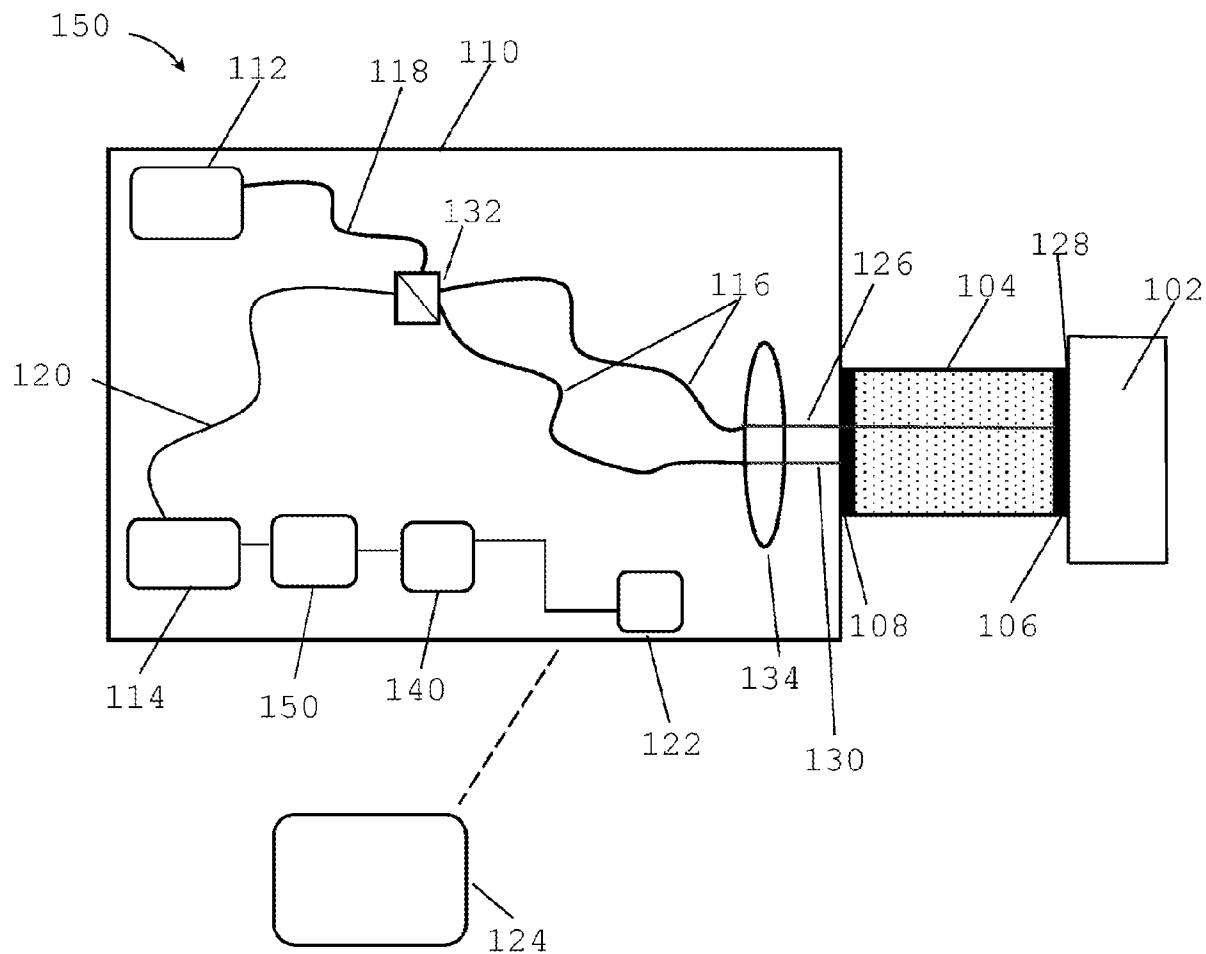


Figura 2

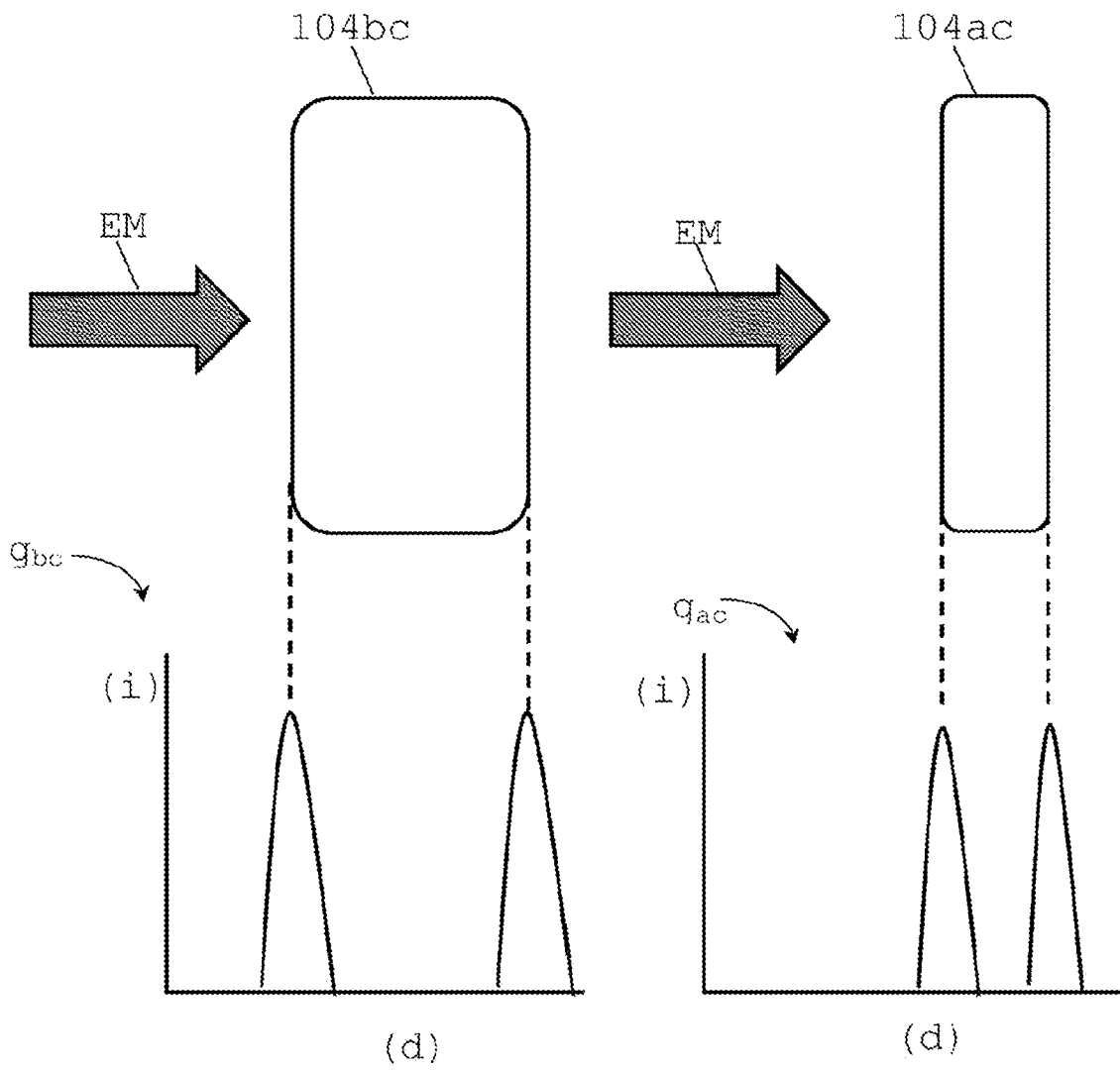


Figura 3a

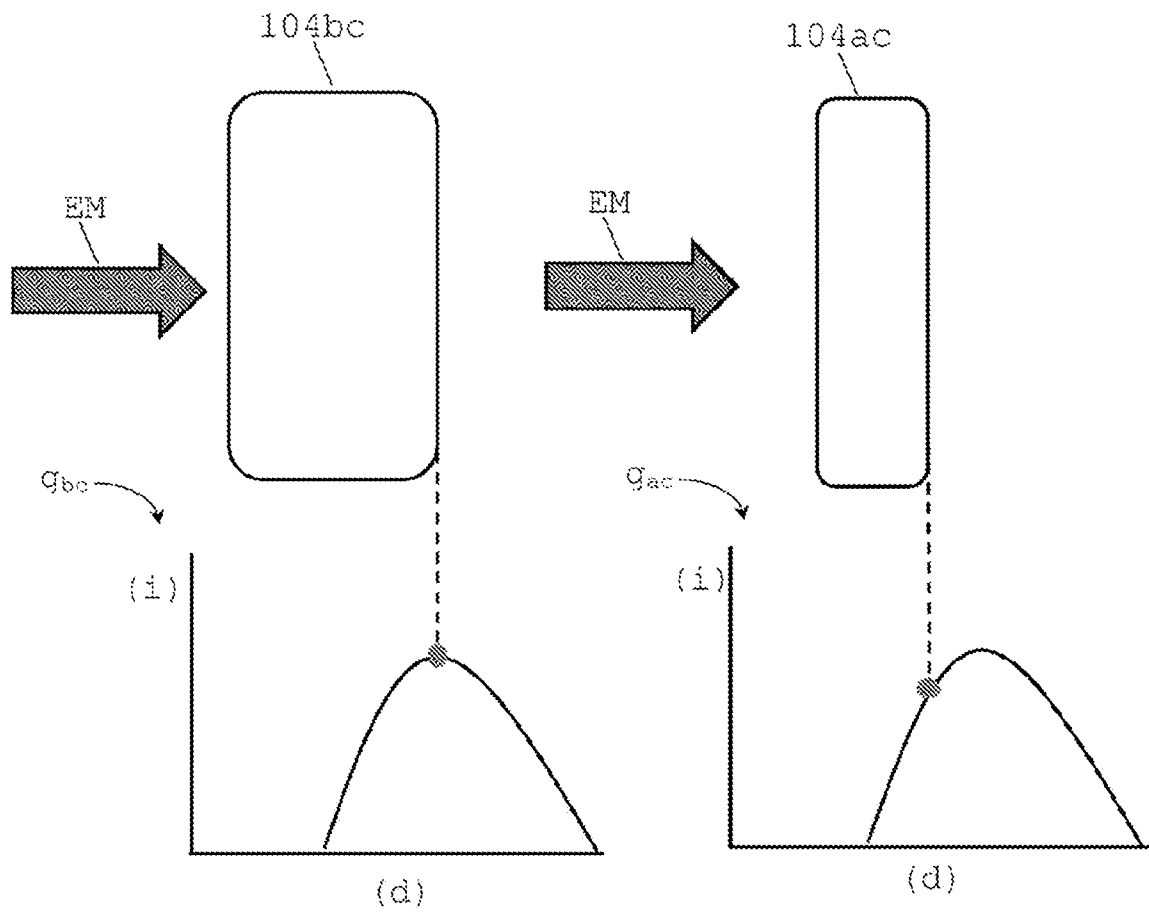


Figura 3b

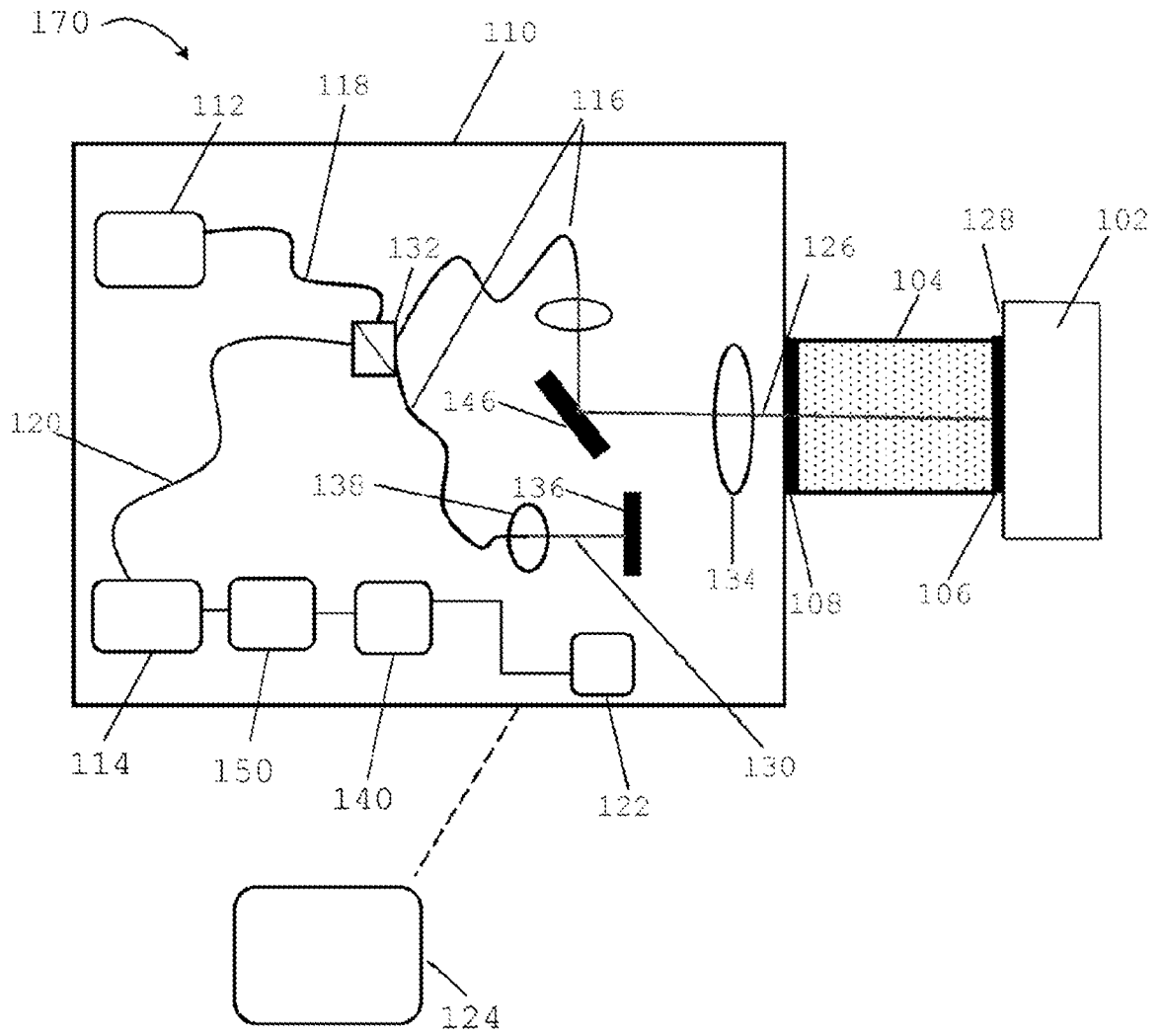


Figura 4

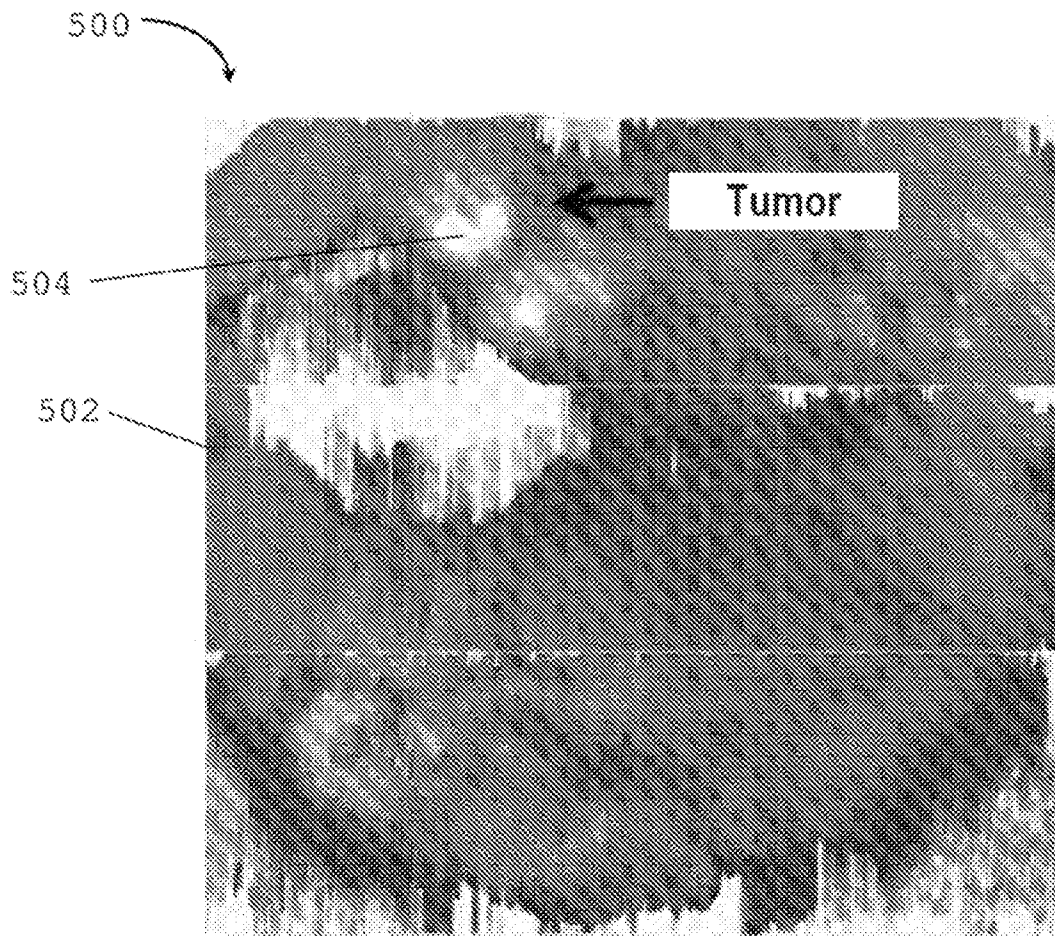


Figura 5a

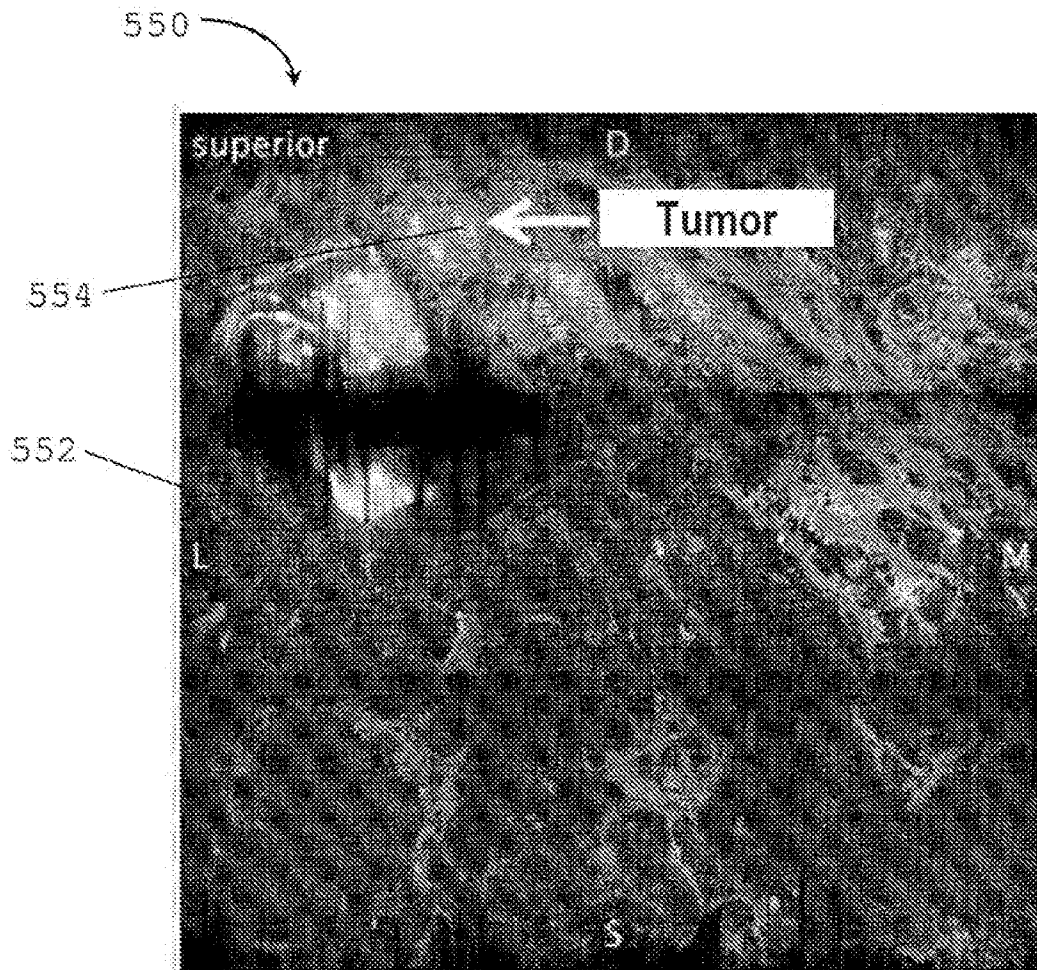


Figura 5b

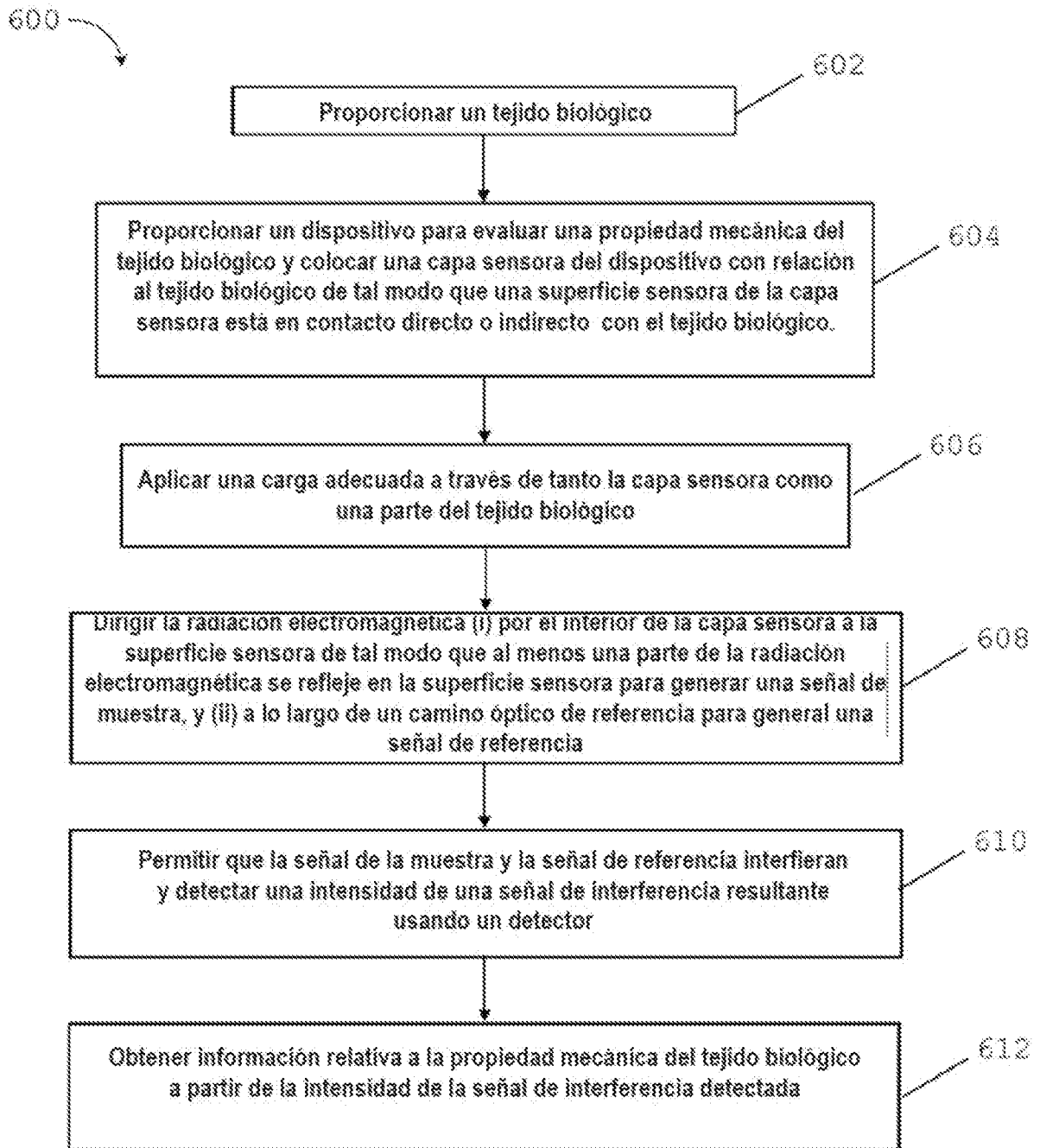


Figura 6

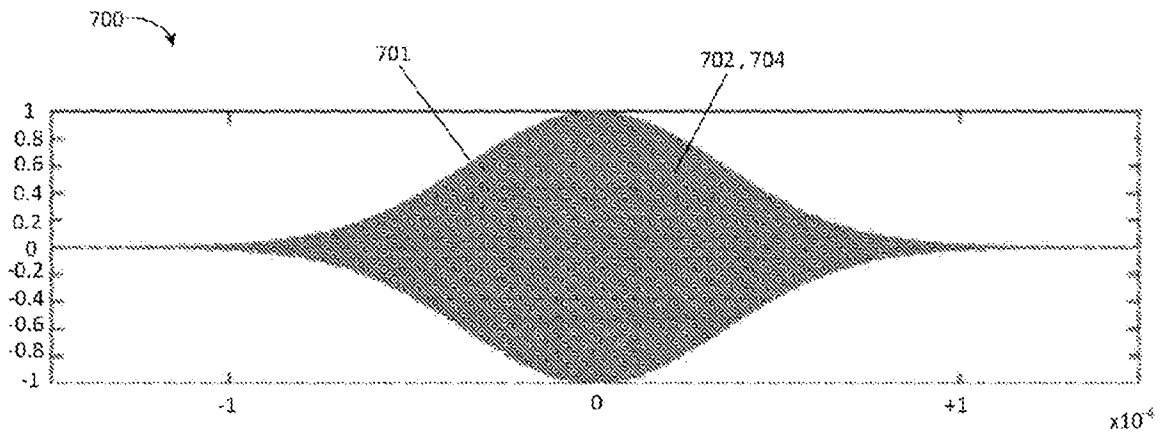


Figura 7a

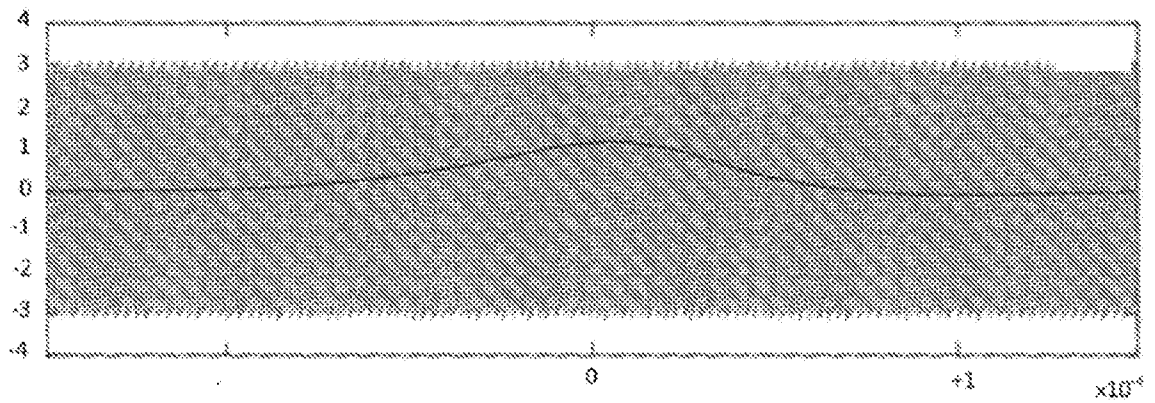


Figura 7b

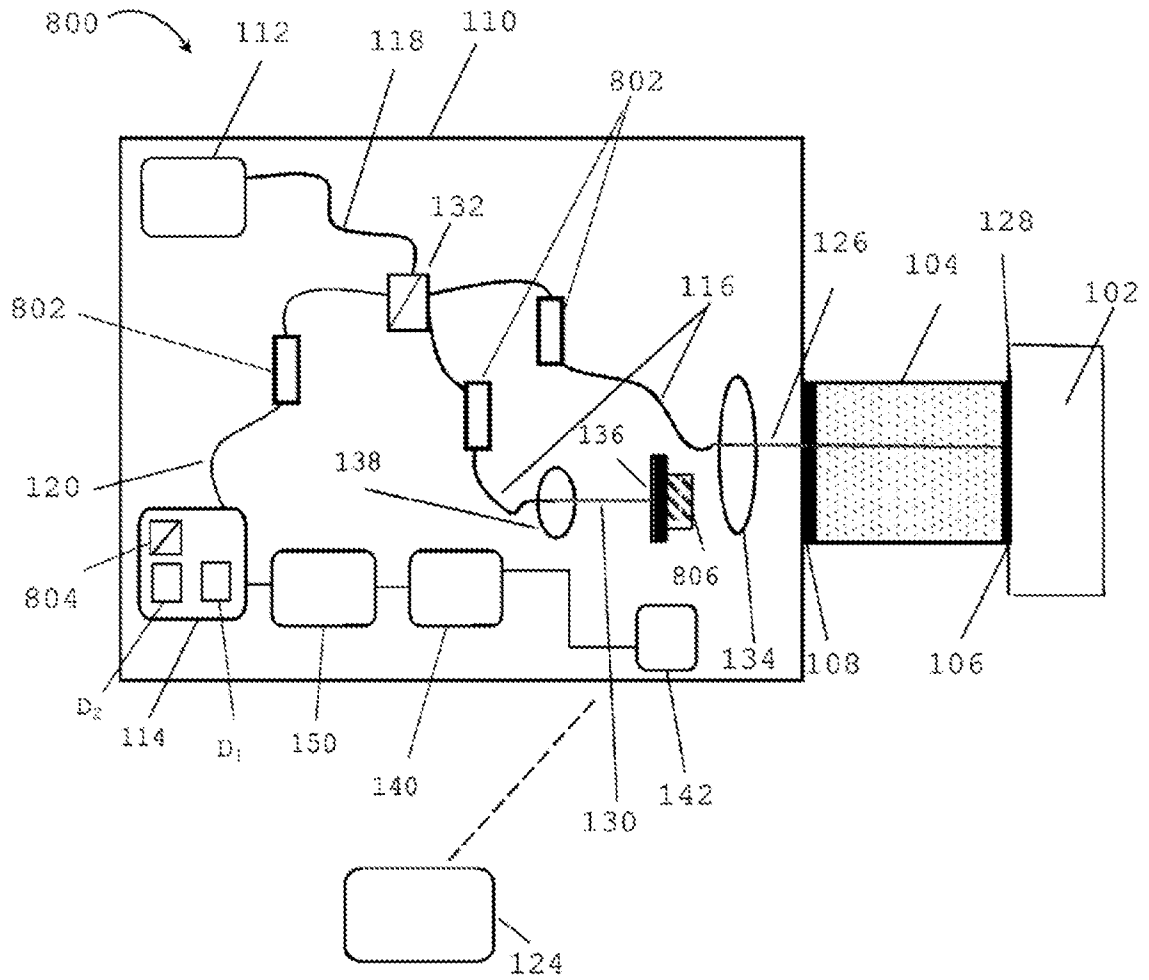


Figura 8a

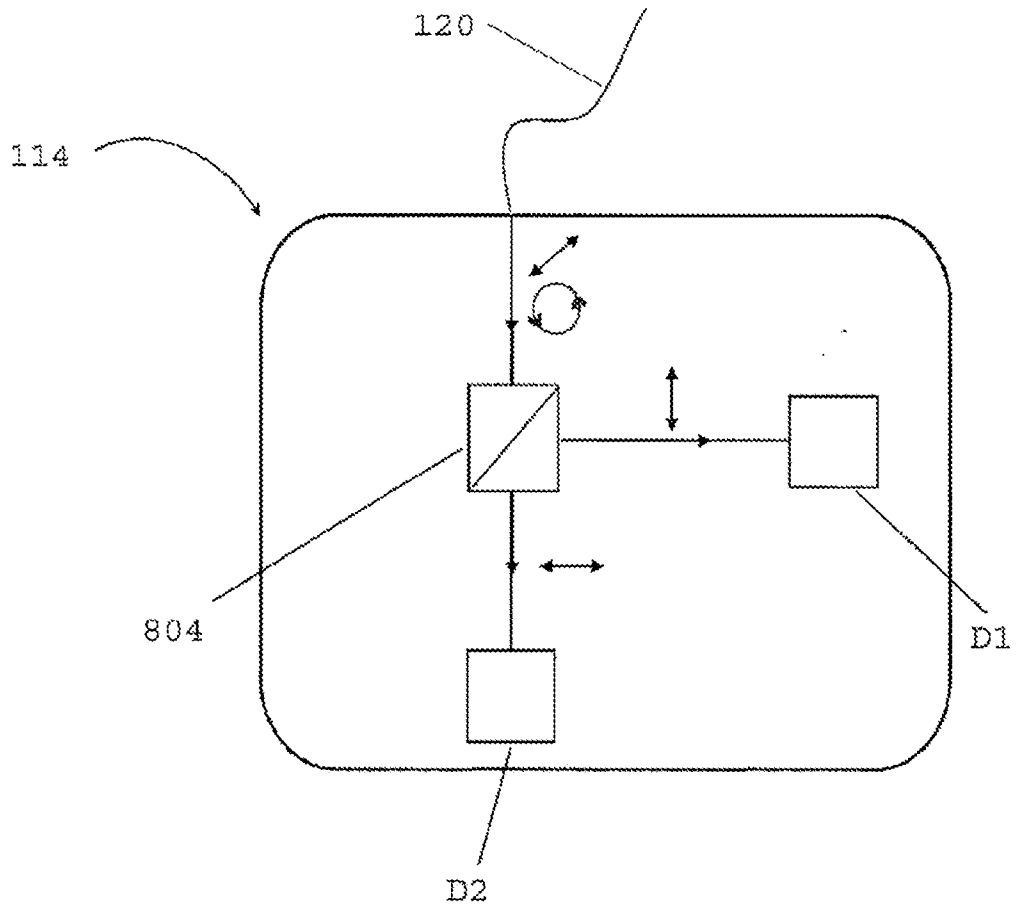


Figura 8b



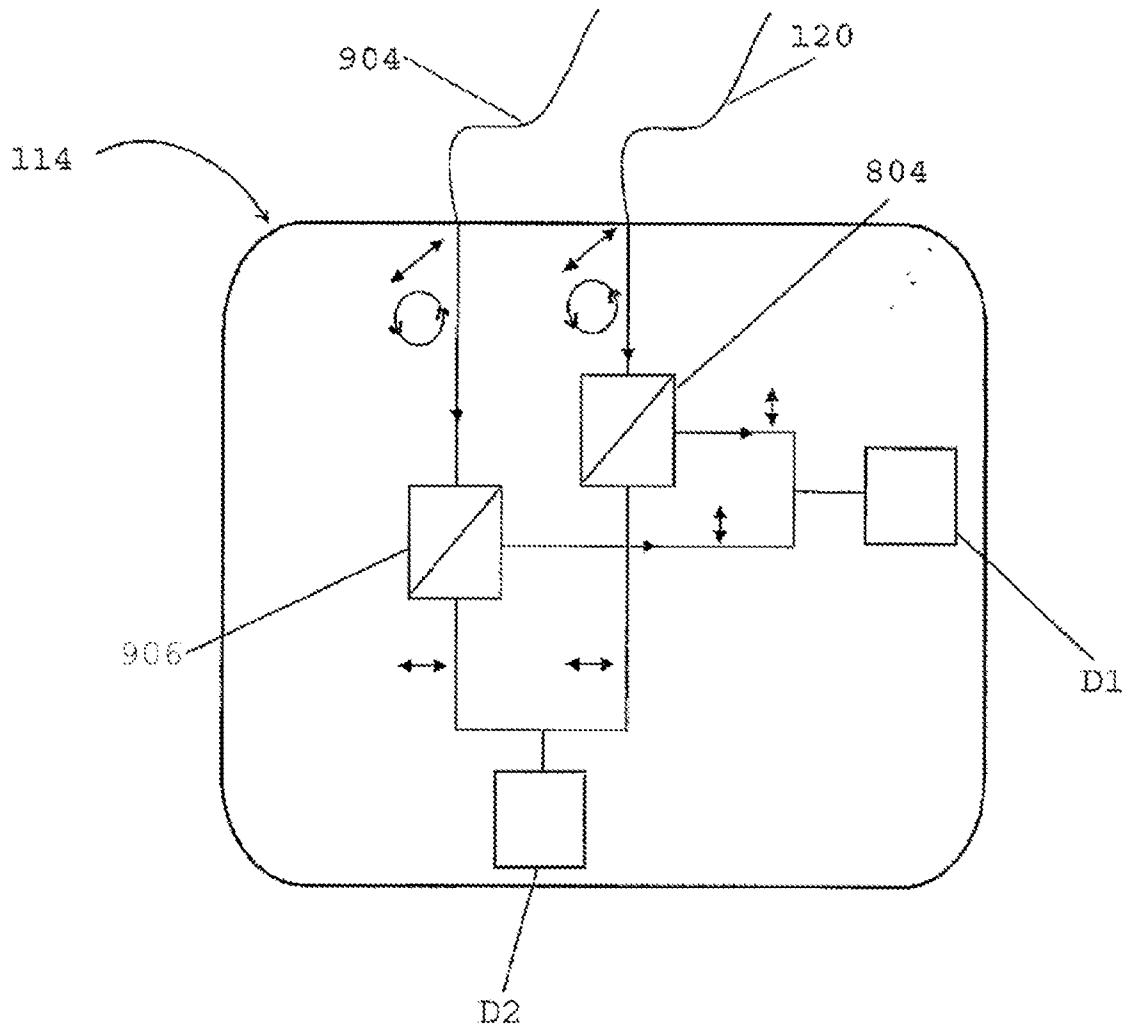


Figura 9b

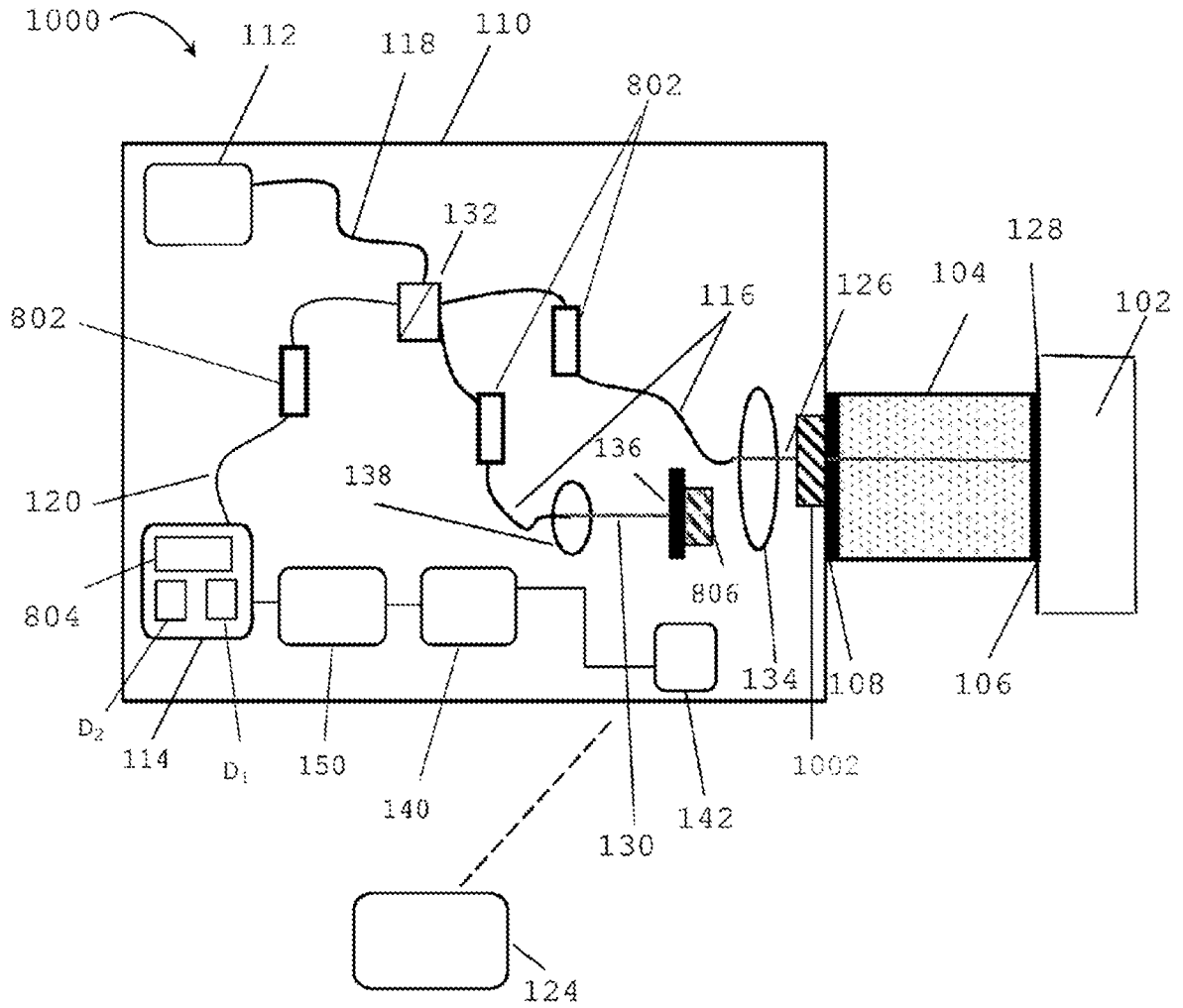


Figura 10

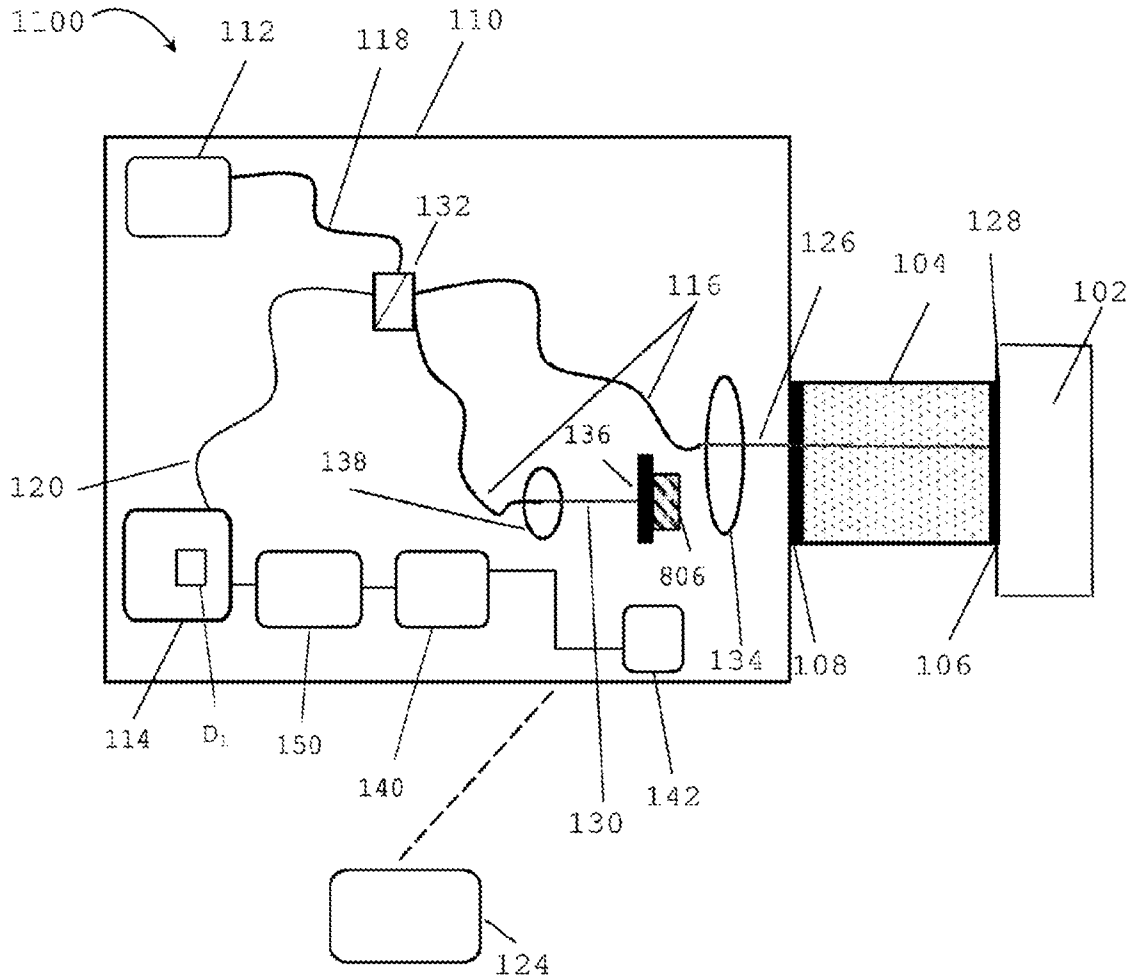


Figura 11