



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 337 555**

51 Int. Cl.:
G01M 11/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01984905 .8**

96 Fecha de presentación : **19.12.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1350084**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.10.2003**

54 Título: **Procedimiento y aparato para detectar grietas y fracturas mediante utilización de redes de Bragg.**

30 Prioridad: **22.12.2000 GB 0031646**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
27.04.2010

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
27.04.2010

73 Titular/es: **EUROPEAN COMMUNITY**
1049 Brussels, BE

72 Inventor/es: **Kenny, Robert, Patrick y**
Whelan, Maurice, Patrick

74 Agente: **Curell Suñol, Marcelino**

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

Procedimiento y aparato para detectar grietas y fracturas mediante la utilización de redes de Bragg.

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un aparato para detectar grietas o fracturas utilizando redes de Bragg y, en particular aunque no de manera exclusiva, a procedimientos y aparatos que también pueden determinar la posición de las grietas o las fracturas a lo largo de un tramo de la red de Bragg, detectando y midiendo cambios en la(s) característica(s) de reflectancia y/o transmitancia de la red.

El problema de la detección y localización de grietas o fracturas (roturas) en materiales, ya sea durante los ensayos o bien durante el servicio, es bien conocido.

En intentos previos por resolver este problema, se han utilizado fibras ópticas adheridas o grabadas en el cuerpo del material o la estructura que se comprobaba o supervisaba.

En un intento previo de resolución mediante dichas fibras ópticas, se ha empleado la técnica conocida como *reflectometría óptica en el dominio del tiempo* (OTDR). En general, esta técnica conlleva el envío de impulsos de luz a lo largo de la fibra. Cuando el cuerpo se agrieta o fractura también se rompe la fibra adherida o grabada, y a continuación la rotura de la fibra forma una superficie reflectante. La superficie reflectante refleja los impulsos y estos regresan de nuevo a la fibra. Midiendo el tiempo transcurrido entre el envío del impulso y la recepción del impulso reflejado desde la rotura, es posible calcular la posición de la rotura. Esta técnica OTDR se utiliza ampliamente en la industria de las telecomunicaciones para detectar roturas en las fibras de comunicación. Sin embargo, esta técnica adolece del inconveniente que presenta una baja resolución de la posición de la rotura. Esto es consecuencia de las dificultades prácticas que conlleva la medición de los tiempos de retardo y de las dificultades que conlleva también intentar inyectar grandes cantidades de energía en impulsos cortos. En pequeñas estructuras, por ejemplo, si la grieta de la fibra se halla cerca de la fuente de impulsos, el tiempo transcurrido entre el envío y la recepción del impulso reflejado puede ser demasiado corto para obtener una medición con la precisión adecuada. Evidentemente, cualquier intento por utilizar equipos más perfeccionados para medir períodos de tiempo cada vez más cortos provoca un incremento de la complejidad y el coste del procedimiento o el aparato.

Debido a estas limitaciones, la OTDR se aplica comúnmente a la detección de grietas con resolución moderada en tramos largos de fibras ópticas para comunicación (que suelen consistir en tramos de longitudes de 1 km o más) y a la detección de la ubicación de las grietas, también en este caso con resolución moderada, en estructuras de gran tamaño, tales como diques y puentes.

Otro intento por aplicar la técnica OTDR a la supervisión de estructuras más pequeñas ha consistido en disponer la fibra en zigzag para incrementar la longitud de la fibra adherida o grabada en la estructura. Los inconvenientes de esta técnica son el incremento de la complejidad y el coste del aparato y también la alteración de las propiedades mecánicas (por ejemplo, resistencia) que puede provocar la gran cantidad de fibra que debe adherirse o grabarse en la estructura.

En otro intento previo por encontrar un procedimiento para la detección de grietas mediante fibras ópticas, se ha utilizado la interferometría. De hecho, la fibra adherida o grabada en la estructura puede utilizarse como un brazo de un interferómetro, siendo proporcionada la reflexión por uno de los extremos de la fibra. Cuando se forma una grieta en la estructura, la grieta puede transmitirse a la fibra, y entonces la grieta formada en la fibra actúa como una superficie reflectante, lo cual determina el acortamiento del brazo del interferómetro.

Por lo tanto, utilizando el sistema interferométrico para detectar cambios en la longitud del “brazo” constituido por la fibra, puede determinarse la posición de la rotura en la fibra. No obstante, uno de los problemas de la técnica interferométrica es que requiere la utilización de luz coherente, y entonces es necesario utilizar luz con longitud de coherencia muy larga cuando se desean detectar grandes cambios (es decir, grandes acortamientos) de la fibra. Nuevamente, esto incrementa la complejidad del procedimiento y el aparato de detección y el coste de su implementación. Cuando se utiliza luz con longitud de coherencia corta, los cambios grandes de la longitud del “brazo” de fibra del interferómetro no se pueden detectar.

En la patente US nº 5.723.857, se describe un procedimiento para medir los defectos estructurales de una estructura, que comprende la conexión de fibras ópticas con redes de Bragg a la estructura, la supervisión de la variación de los parámetros de la luz mediante medición en el dominio del tiempo para localizar la posición de una grieta a lo largo de la fibra y la supervisión de deformaciones puntuales midiendo las características de la luz reflejada desde la red de Bragg. La presencia de las redes de Bragg dentro de la fibra solo sirve para proveer información secundaria relacionada con el estado de deformación mecánica en puntos preseleccionados.

Análogamente, en el documento “Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fibre Bragg grating sensors” de Okabe *et al.* (2000), se describe la utilización de sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica para detectar grietas transversales midiendo la distribución de la deformación. Esta invención/técnica se basa en la deducción de la presencia de grietas transversales en un compuesto analizando el espectro reflejado desde una red de Bragg. La presencia de grietas da como resultado una zona de influencia de la deformación no uniforme. No obstante, dichas zonas de influencia de deformación no uniformes pueden manifestarse en un material o una estructura

debido a la no homogeneidad o anisotropía del propio material o estructura situados en el entorno de la red, es decir, pueden no ser necesariamente ocasionadas por las grietas.

Uno de los objetivos de los aspectos de la presente invención consiste en encontrar un procedimiento y un aparato para detectar grietas o fracturas, u otros tipos de daños, en un cuerpo, que resuelvan por lo menos parcialmente los problemas asociados a los procedimientos y aparatos previos.

En particular, las formas de realización de la presente invención pretenden encontrar un procedimiento de detección de grietas más sencillo o un procedimiento que ofrezca una resolución incrementada de la posición de las grietas.

Debe tenerse en cuenta que en la descripción y las reivindicaciones siguientes el término “grieta” abarca tanto grietas, fracturas y roturas como otros tipos de daños sufridos por un cuerpo, dependiendo del contexto en que se halle.

Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un procedimiento para detectar una grieta o fractura en un cuerpo, que comprende las etapas siguientes:

adherir o empotrar una red de Bragg a una superficie del cuerpo o grabado de dicha red en el cuerpo;

medir las características de reflectancia o transmitancia de la red de Bragg;

transmitir (es decir, propagación) una grieta o fractura del cuerpo a la red de Bragg para romper la red de Bragg en una primera parte y una segunda parte y

detectar la rotura de la red de Bragg detectando un cambio provocado en las características de reflectancia o transmitancia de la red de Bragg.

En determinadas formas de realización, se puede medir y supervisar más de una característica. Las características pueden comprender un espectro de reflectancia o transmitancia.

Las redes de Bragg son muy conocidas, y tanto el conocimiento como la comprensión de sus características de reflectancia y transmitancia son muy buenos.

Las redes de Bragg adecuadas para utilizar en las formas de realización de la presente invención habitualmente comprenden una estructura de guía de onda óptica. A lo largo de la trayectoria óptica a través de la estructura, el índice de refracción n experimenta una modulación de tipo periódico. Las zonas de índice de refracción modificado (es decir, las zonas cuyo índice de refracción es diferente del índice de refracción global del material de la trayectoria óptica) de hecho constituyen los “elementos” de la red. La reflexión de la luz incidente en la red es consecuencia de la interferencia constructiva entre los haces reflejados por elementos consecutivos.

Existen en el mercado redes de Bragg en forma de estructuras de guía de onda plana que pueden utilizarse en ciertas aplicaciones de la presente invención.

No obstante, las redes de Bragg que adoptan la forma de redes de Bragg en fibra tal vez tienen una aplicación más amplia. Las redes de Bragg en fibra (FBG) son muy conocidas y comprenden un tramo de fibra óptica (habitualmente, fibra monomodo) que presenta un índice de refracción n que experimenta una modulación de carácter periódico a lo largo de su longitud. Se utilizan diversas técnicas para generar la modulación Δn , y el valor máximo de $\Delta n/n$ suele estar comprendido entre 10^{-6} y 10^{-3} . Por analogía con las redes de “líneas” convencionales, la red de Bragg en fibra puede considerarse una serie de elementos de red, cada uno de los cuales consiste en una zona de índice de refracción modificado, a lo largo de una fibra óptica. En realidad, los “bordes” de los elementos de red no están bien definidos, y en una FBG que presenta un paso constante el índice de refracción puede variar simplemente de una manera sinusoidal a lo largo de la fibra.

También puede utilizarse la expresión “reflector de red de Bragg” para hacer referencia a redes de Bragg adecuadas para utilizar en las formas de realización de la presente invención.

El paso de la red de Bragg es la separación entre los picos o depresiones adyacentes en la variación del índice de refracción a lo largo de la trayectoria óptica (es decir, el paso es el espaciado de los “elementos” de red). En el caso de las FBG, el paso es el espaciado de los elementos de red a lo largo del tramo de fibra.

El paso físico Λ (o período) de la red se relaciona con la longitud de onda de Bragg λ mediante la ecuación (1) indicada más abajo, y de ahí se obtiene el paso eficaz de la red, un valor importante que es el producto del índice de refracción y el paso físico, es decir $n\Lambda$.

Existen en el mercado redes de Bragg que presentan un paso eficaz sustancialmente uniforme a lo largo de su longitud. También existen redes de Bragg moduladas pulsadas (en inglés, “chirped”), en las que el paso eficaz varía de

alguna manera a lo largo de la longitud de la red. Si el índice de refracción global a lo largo de la red es sustancialmente constante, es por supuesto posible obtener un paso eficaz uniforme o variable simplemente proporcionando un paso físico uniforme o variable, respectivamente.

En el artículo de revisión "In-Fibre Bragg grating sensors", Yun-Yiang Rao, Meas. Sci. Technol. 8 (1997) 355-375, se describen las FBG y sus características de reflectancia. En este documento, Rao enseña cómo las reflectividades de la red pueden alcanzar aproximadamente el valor 100% a longitudes de onda particulares. Rao además indica que, cuando se ilumina una FBG mediante una fuente de luz de banda ancha, un conjunto de haces reflejados desde un conjunto de planos parcialmente reflectantes formados mediante modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra interfieren entre sí. La interferencia entre dos haces es destructiva, a menos que los haces estén en fase uno con el otro. Según la ley de Bragg, la interferencia constructiva (y por lo tanto la reflexión) se produce cuando los haces tienen la misma longitud de onda λ_B , proporcionada por:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

Siendo n el índice de refracción eficaz del núcleo y Λ el paso físico.

Para una FBG uniforme (es decir, no modulada pulsada), la reflectividad a la longitud de onda de Bragg puede calcularse utilizando la ecuación siguiente:

$$R = \tanh^2 \Omega \quad (2)$$

en la que:

$$\Omega \propto (L/\lambda_B) (\Delta n/n) \quad (3)$$

Así pues, R es una función de la longitud L de la red y la perturbación del índice ($\Delta n/n$) (es decir, el grado hasta el cual el índice de refracción del núcleo se modula).

Para una red uniforme, Rao declara además que el ancho de banda FWHM (ancho de banda completo a la mitad del máximo), $\Delta\lambda$, de la red viene determinado aproximadamente por la ecuación siguiente:

$$\Delta\lambda \propto \lambda_B [(\Delta n/2n)^2 + (1/N)^2]^{1/2} \quad (4)$$

siendo N el número de planos de la red (el número de elementos de la red). Para un paso uniforme, N será evidentemente proporcional a L , la longitud de la red.

Se observará, pues, que si una FBG uniforme se rompe en una posición de su longitud de tal forma que la luz incidente no puede alcanzar la "2ª" parte, el espectro de reflectancia se ensancha y la magnitud (es decir, la altura máxima) de la reflectancia se reduce en comparación con los parámetros de la red que no está rota. Por lo tanto, para detectar una rotura en la FBG (u otro tipo de red de Bragg) basta con detectar una reducción en la reflectancia de la red a la longitud de onda de Bragg nominal o a una longitud de onda cercana a esta. La magnitud de esta reducción puede utilizarse también para calcular la posición de la rotura mediante las ecuaciones anteriores, por ejemplo.

Sin embargo, una propuesta más perfeccionada y precisa consiste en utilizar la magnitud del pico y la anchura del espectro de reflectancia para determinar la posición de la rotura.

Preferentemente, en las formas de realización de la presente invención, se miden los espectros de reflectancia y transmitancia de una red, lo cual permite utilizar las mediciones de transmisión para normalizar la señal de reflectancia. La intensidad de la señal de reflectancia depende de las pérdidas del aparato de medición, que pueden variar a lo largo del tiempo, y asimismo de la intensidad de salida de, por ejemplo, las fuentes de luz utilizadas, que también puede variar. Por lo tanto, el procedimiento de normalización tiene en cuenta las pérdidas variables de la señal y las variaciones de la fuente y facilita un cálculo mejorado de la señal de reflectancia absoluta, para realizar la comparación entre el ancho de banda de reflectancia anterior y posterior a la fractura.

Tal como se ha mencionado anteriormente, se dispone también de redes moduladas pulsadas. Estos dispositivos actúan como filtros de pasabanda para longitudes de onda en los que el paso de la red varía a lo largo de su longitud. Una red modulada pulsada refleja un rango de longitudes de onda (es decir, refleja una cantidad de frecuencias ópticas diferentes) eficazmente, desde diferentes posiciones de su longitud. Se supone ahora que se dispone de una red modulada pulsada cuyo paso varía desde el valor $\Lambda_1\#$ de un extremo hasta el valor $\Lambda_2\#$ del otro extremo, para permitir la

reflexión de la luz incidente en el rango de longitudes de onda comprendidas entre λ_{B1} ($= 2n \Lambda_1$) y λ_{B2} ($= 2n \Lambda_2$). Si la red se rompe en una posición situada en un punto intermedio de su longitud, de tal forma que el extremo de paso Λ_2 deja de ser accesible para la luz incidente, entonces el paso Λ_3 de la posición de la rotura es el que determina el ancho de banda de reflexión reducido, $\lambda_{B1} - \lambda_{B3}$, siendo $\lambda_{B3} = 2n\Lambda_3$. Por lo tanto, la medición del ancho de banda de

- 5 reflectancia de una red modulada pulsada antes y después de la rotura facilita una indicación de la posición de la rotura. Resultará ventajoso que la red sea una red modulada pulsada lineal (es decir, que el paso varíe como una función lineal de la posición a lo largo de la longitud de la red), de tal forma que en una primera estimación el ancho de banda de reflexión sea simplemente proporcional a la longitud accesible de la red (es decir, la longitud antes de la rotura).
- 10 La descripción anterior hace referencia a grietas o roturas de suficiente importancia que se transmiten a la red de Bragg, y que por lo tanto impiden la transmisión de luz a través de la rotura de la red. No obstante, el procedimiento de la presente invención puede utilizarse también para detectar daños menos graves, como por ejemplo grietas que provocan una alineación parcial de las “mitades” de la red (y que por lo tanto permiten la transmisión parcial a

- 15 (reflector de banda ancha) para la luz incidente.

Se conocen unas técnicas analíticas, habitualmente implementadas mediante un procesador correctamente programado, que pueden determinar numerosos parámetros de una red a partir de sus características de reflectancia o transmisión (por ejemplo, los espectros). Por ejemplo, se describen técnicas adecuadas en el documento “A Genetic

- 20 Algorithm for the Inverse Problem in Synthesis of Fiber Gratings”, J. Skaar y K.M. Risvik, Journal of Lightwave Technology, vol. 16, n.º 10, octubre de 1988, pp. 1982-1992. Un ejemplo del problema inverso tratado en el documento es la determinación de un perfil de modulación del índice de la red en fibra (FBG) correspondiente a un espectro de reflexión determinado.

- 25 En determinadas formas de realización de la presente invención, estas técnicas se utilizan para detectar y preferentemente determinar la posición de dichas grietas de menor gravedad a partir del cambio resultante en los espectros de reflectancia o transmisión de la red.

Cabe reiterar, en la presente memoria que la comprensión alcanzada de la relación entre las características de

- 30 reflectancia y transmitancia de las redes de Bragg y sus parámetros físicos es muy buena.

A partir de la descripción anterior, resultará evidente que midiendo las características de reflectancia y transmitancia (por ejemplo, los espectros) de la red que no presenta roturas y a continuación supervisando los cambios en estas características (por ejemplo, midiendo los espectros de reflectancia o transmitancia en un momento posterior, es decir,

- 35 los espectros de la red “rota”) podrá detectarse la presencia de una grieta en el cuerpo.

El procedimiento de la presente invención ofrece la ventaja de poder detectar la presencia de una rotura utilizando un aparato relativamente sencillo a un coste relativamente bajo (por ejemplo, una fuente de luz de banda ancha tal como un LED que ilumina la red, y que a su vez puede tener un coste de fabricación bajo, y un analizador de espectros

- 40 ópticos) comparado con los utilizados en técnicas anteriores.

Además, siempre y cuando se conozca con cierta precisión la posición de la red con respecto al cuerpo, el procedimiento podrá detectar la posición de la grieta con dicha precisión por lo menos detectando simplemente el cambio o los cambios producidos en las características de reflectancia y transmitancia de la red. En esta técnica, no es necesario

- 45 realizar la medición de intervalos de tiempo sumamente pequeños ni utilizar luz de longitud de coherencia larga.

Por lo tanto, las grietas pueden detectarse observando los cambios en el espectro de reflectancia de una red, resultantes del acortamiento de su longitud efectiva.

- 50 Una ejecución simple del procedimiento de la presente invención consiste en supervisar la magnitud de la señal reflejada por una red uniforme (por ejemplo, en medir la reflectancia máxima a la longitud de onda de Bragg nominal). Si la longitud efectiva de la red se reduce debido a la formación de una grieta suficientemente grande (es decir, una grieta que provoca una desalineación total de las dos mitades de la red rota), entonces se observa que la magnitud de la señal reflejada se reduce.

Preferentemente, el procedimiento comprende además la etapa de determinación de la posición de la rotura del reflector de red de Bragg a lo largo de su longitud, a partir del cambio resultante en las características de reflectancia y transmitancia. Esta información posicional puede, por ejemplo, deducirse a partir del cambio medido en la magnitud de la señal reflejada por la red (por ejemplo, la reducción en magnitud) o a partir del cambio en la anchura del espectro

- 60 de reflectancia y transmitancia óptica (por ejemplo, el ensanchamiento). En el caso de una red uniforme, la anchura supervisada puede ser la FWHM y en el caso de una red modulada pulsada, la anchura puede ser el ancho de banda de reflectancia.

Preferentemente, la etapa de medición comprende la etapa de medición del espectro de reflectancia óptica de la red intacta, y la etapa de detección del cambio resultante comprende la etapa de medición del espectro de reflectancia óptica de la primera parte. La comparación de estos espectros puede facilitar una indicación de la presencia de la rotura y de su posición.

- 65

ES 2 337 555 T3

5 Preferentemente, el procedimiento comprende además la etapa de medición del espectro de reflectancia óptica de la segunda parte. La comparación de este espectro con el espectro de reflectancia original de la red intacta provee otra indicación de la posición de la rotura. Las posiciones estimadas de la rotura a partir de los espectros de reflectancia de la primera y la segunda parte pueden combinarse para facilitar una indicación más precisa de la posición de la rotura.

Convenientemente, la etapa de detección del cambio resultante comprende la etapa de comparación respectiva de las intensidades o las anchuras de los espectros de reflectancia óptica.

10 Las ecuaciones anteriores pueden utilizarse para calcular las longitudes de la primera y la segunda partes en relación con la red intacta, a partir de estas intensidades y anchuras de reflectancia.

Preferentemente, la etapa de determinación de la rotura comprende la etapa de comparación de las respectivas intensidades o anchuras de los espectros de reflectancia óptica. También en este caso, las ecuaciones anteriores pueden utilizarse para determinar la longitud de la primera parte o la segunda parte con respecto a la red intacta.

Preferentemente, la red de Bragg presenta un paso sustancialmente uniforme, y la etapa o las etapas de comparación comprenden cada una la etapa de comparación de las intensidades o las anchuras de los respectivos picos centrales de los espectros de reflectancia óptica.

20 La red de Bragg puede ser una red modulada pulsada, y la etapa o las etapas de comparación pueden comprender cada una la etapa de comparación de los respectivos anchos de banda de los espectros de reflectancia óptica.

En lugar de comparar directamente los espectros medidos, el procedimiento puede comprender las etapas de determinación, mediante técnicas analíticas, de los parámetros de la red intacta y la red rota, a partir de los espectros de reflectancia, comprendiendo los parámetros por lo menos la longitud de la red o el número de planos reflectantes, y la etapa de detección de la presencia de la rotura puede comprender la etapa de comparación de los parámetros determinados. Ventajosamente, los parámetros pueden utilizarse para determinar la posición de la rotura.

30 Convenientemente, la etapa de medición de las características de reflectancia o transmitancia óptica comprende las etapas de provisión de luz a la red de Bragg desde una fuente de banda ancha, y de detección del espectro de reflectancia o transmitancia mediante un analizador de espectros ópticos.

Preferentemente, la etapa de detección del cambio resultante comprende las etapas de utilización de la fuente de banda ancha y el analizador de espectros ópticos para medir el espectro de reflectancia o transmitancia de la red rota.

Preferentemente, la etapa de medición de las características ópticas o de transmitancia comprende las etapas de provisión de luz a la red de Bragg desde una fuente de láser sintonizable, control del láser para efectuar el barrido de la longitud de onda de la luz suministrada a través de un rango y detección de la luz reflejada o transmitida por la red intacta mediante un detector de banda ancha.

Preferentemente, la etapa de detección del cambio resultante comprende las etapas de utilización del láser sintonizable y el detector de banda ancha para medir el espectro de reflectancia o transmitancia de la red rota.

45 Existen otros sistemas para medir los espectros de reflectancia o transmitancia, que pueden utilizarse ventajosamente en las formas de realización de la presente invención. Entre estos, cabe citar la utilización de un sistema de filtro de barrido que puede comprender por ejemplo una cavidad Fabry-Perot de barrido o un filtro acústico óptico sintonizable (AOTF). También pueden utilizarse técnicas basadas en filtros de borde.

50 Preferentemente, en el procedimiento se utiliza una red de Bragg en fibra.

La FBG puede comprender fibra de vidrio. Ventajosamente, la red puede fabricarse en fibra de plástico. Dichas fibras de plástico facilitan el procesamiento y el tratamiento para alterar de manera controlada los parámetros y características de la red.

55 Preferentemente, el procedimiento comprende además la etapa de revestimiento de la red de Bragg en fibra para mejorar la transmisión de la grieta o la rotura a la red. Por lo tanto, se podrá revestir el reflector para aumentar su fijación al cuerpo que se desea supervisar.

60 Preferentemente, se puede someter el reflector de red de Bragg a fragilización para evitar de ese modo que refuerce el cuerpo. La fragilización puede ser deseable también para asegurar que la red se resquebraje como consecuencia de una grieta en la parte adyacente del cuerpo.

Ventajosamente, la red puede procesarse o tratarse de otras maneras para optimizar sus propiedades en relación con las del cuerpo (por ejemplo, obtener la misma resistencia, una mejor fijación o una mejor transmisión de grietas transversales).

ES 2 337 555 T3

Según un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato para detectar grietas o roturas en un cuerpo, comprendiendo el aparato:

una red de Bragg que se adherirá a una superficie del cuerpo o se empotrará en el mismo;

una fuente de luz y un detector de luz para medir el espectro de reflectancia o transmitancia de la red de Bragg y

un procesador operativo para detectar roturas a lo largo del tramo de la red de Bragg, detectando cambios en el espectro de reflectancia o transmitancia.

La “fuente de luz” suministra radiación electromagnética a la red. Esta radiación no se halla necesariamente dentro del espectro visible, sino que puede hallarse en otras zonas del espectro óptico o puede hallarse completamente fuera del espectro óptico (por ejemplo, puede ser una fuente de microondas).

Preferentemente, el procesador es operativo además para determinar la posición de la rotura a lo largo del tramo de la red, a partir de las mediciones de los espectros de reflectancia o transmitancia antes y después de la rotura.

Convenientemente, la fuente de luz puede comprender una fuente de banda ancha (por ejemplo, un LED) y el detector puede comprender un analizador de espectros ópticos.

Como alternativa, la fuente de luz puede comprender un láser sintonizable y el detector puede comprender un detector de banda ancha (por ejemplo, un fotodiodo).

Preferentemente, la red de Bragg es una red de Bragg en fibra.

Preferentemente la red de Bragg en fibra está revestida para facilitar la fijación al cuerpo (y de ese modo mejorar la transmisión de una grieta del cuerpo a la red), y preferentemente la red se somete a fragilización.

Según un tercer aspecto de la presente invención, se proporciona un cuerpo en combinación con un aparato como el definido anteriormente, en el que la red de Bragg se adhiere a una superficie del cuerpo o se graba en este.

A continuación, se describen las formas de realización de la presente invención haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es un diagrama esquemático de un cuerpo en combinación con un aparato de detección de grietas según una forma de realización de la presente invención;

la figura 2 es un diagrama esquemático del espectro de reflectancia de la red de Bragg intacta de la figura 1 (es decir, antes de formarse la grieta);

la figura 3 es una representación esquemática del espectro de reflectancia de la red de la figura 1 después de formarse la grieta, medido en la dirección de entrada de la luz;

la figura 4 es una representación esquemática del espectro de reflectancia o el ancho de banda de una red de Bragg en fibra modulada pulsada antes y después de que se forme la grieta en algún lugar de su longitud;

la figura 5 es un diagrama esquemático de una serie de redes de Bragg en fibra de longitudes de onda de Bragg nominales diferentes adheridas a la superficie de un cuerpo B;

la figura 6 es un diagrama esquemático de un cuerpo en combinación con un aparato de detección de grietas según otra forma de realización, antes de que se forme la grieta;

la figura 7 es un diagrama esquemático del cuerpo y el aparato de la figura 6 después de que se forme la grieta y

la figura 8 es un diagrama esquemático de un cuerpo en combinación con un aparato de detección de grietas según otra forma de realización diferente de la presente invención.

Haciendo referencia a la figura 1, en una primera forma de realización de la presente invención, se graba una red de Bragg en fibra 1 en un cuerpo B. Dicho cuerpo puede considerarse como una estructura inteligente puesto que comprende la red para propósitos de auto diagnóstico. A la red de Bragg en fibra 1, se le suministra luz incidente i de un láser sintonizable que transmite una señal de luz I a la red por medio de un acoplador óptico de fibra 2. El láser sintonizable emite luz en una banda de longitudes de onda estrecha, y el láser sintonizable recibe una señal de control S desde un generador de rampa 42 que a continuación efectúa un barrido de las longitudes de onda de salida del láser a través de un rango determinado. Asimismo, se aplica la señal de salida del generador de rampa a un microprocesador 5, y de esta forma se puede supervisar la longitud de onda de salida del láser sintonizable en cualquier momento

determinado. En formas de realización alternativas, el propio láser sintonizable puede transmitir una señal $f(\lambda_{out})$ al microprocesador para que éste realice esta función de supervisión.

Cuando está intacta, la red 1 interactúa con la luz suministrada para generar una señal reflejada R y también permite el paso a su través de la señal transmitida T. La señal transmitida T se transmite a un detector de luz de banda ancha, que en esta forma de realización es un fotodiodo 3_r . El fotodiodo es operativo para generar una señal de salida P2 que es proporcional a la intensidad de la luz incidente en cualquier momento determinado en el fotodiodo. Esta señal P2 se transmite al microprocesador 5. La señal reflejada R regresa al acoplador 2, y una parte de esta, r , se suministra a un segundo fotodiodo 3_r que transmite una señal de supervisión P1 al microprocesador.

Antes de que se forme una grieta en la red, el espectro de reflectancia de la red (es decir, el gráfico de la intensidad de la señal reflejada r incidente en el fotodiodo 3_r en función de la longitud de onda encontrada por el láser sintonizable al efectuar un barrido a través de su rango de longitudes de onda) es como el representado en la figura 2. Dependiendo del tipo de red preciso, pueden ponerse de manifiesto otras características en el espectro real, tales como unos lóbulos laterales, aunque para simplificar en la figura 2 únicamente se representa un pico de reflectancia central, centrado en la longitud de onda de Bragg nominal λ_B de la red de Bragg (que en este caso es uniforme, es decir, no modulada pulsada). En la práctica, la red de Bragg comúnmente será apodizada. La técnica de apodización es muy conocida y puede utilizarse para reducir (suprimir) o aumentar los lóbulos laterales tal como se desee. La intensidad máxima I_0 puede encontrarse en la zona del 100% si la red es suficientemente larga y la profundidad de modulación del índice de refracción es suficientemente grande. El pico central presenta un ancho de banda completo a la mitad del máximo (FWHM) igual a W_0 .

Cuando se forma una grieta C en el cuerpo B y ésta se transmite a la red, las propiedades de reflexión y transmisión de la red cambian como consecuencia de este hecho. El aparato de la figura 1 es operativo para medir reiteradamente las propiedades de reflectancia y transmitancia de la red, y detectar de ese modo cualquier cambio de este tipo y por consiguiente determinar la formación de una grieta. En determinadas formas de realización, el procesador almacena los espectros medidos en un primer intervalo de tiempo y los compara con los espectros medidos en intervalos de tiempo posteriores. Se considera a continuación un caso en el que la grieta C es suficientemente grande como para impedir la transmisión de luz a través de la red, es decir, en el que la luz suministrada desde el láser sintonizable no puede alcanzar el fotodiodo 3_r .

En este caso, todavía se dispondrá de una señal reflejada desde la red, pero la reflexión solo se produce en la parte de la red situada antes de la grieta C. Esta parte es, por supuesto, de longitud más corta que la red original y, por lo tanto, el espectro de reflectancia después de la grieta presenta una intensidad máxima inferior y una anchura incrementada. En la figura 3, se representa un diagrama esquemático del espectro de reflectancia de esta primera parte de la red (es decir, de la red después de formarse la grieta). La intensidad máxima se ha reducido desde I_0 hasta I_c , y mientras que el pico central todavía está centrado en la longitud de onda de Bragg nominal λ_B de la red, el ancho de banda completo a la mitad del máximo W se ha incrementado desde W_0 hasta W_c . En la forma de realización representada en la figura 1, el microprocesador es operativo para determinar, a partir de la medición de los espectros de reflectancia, las respectivas longitudes de la red intacta y la primera parte de la red una vez formada la grieta, mediante las ecuaciones (2), (3) y (4) anteriores. Por lo tanto, aparte de poder detectar la formación de una grieta, el microprocesador también puede determinar la posición de la grieta a lo largo de la longitud de la red, comparando las longitudes relativas de la primera parte y la red intacta. En esta forma de realización, la red 1 se coloca inicialmente en una posición precisa con respecto al cuerpo B, para que el microprocesador pueda de ese modo facilitar una indicación precisa de la posición de la grieta dentro del cuerpo.

Aunque en la forma de realización anterior se utiliza una red de Bragg en fibra uniforme, en formas de realización alternativas se pueden utilizar redes moduladas pulsadas. Como se ha descrito anteriormente, cuando se produce una grieta importante en una red modulada pulsada, el ancho de banda de reflectancia de esta por lo general se reduce. El aparato representado de forma general en la figura 1 puede utilizarse para supervisar las características de reflectancia de una red modulada pulsada grabada en el cuerpo B. En la figura 4, se representa en línea continua la forma aproximada del espectro de reflectancia para una red con chirp intacta, que refleja luz en un ancho de banda comprendido entre λ_1 y λ_2 . Por otro lado, la línea discontinua de la figura 4 representa la reducción en el ancho de banda de reflectancia de la red modulada pulsada, provocada por una grieta importante formada en algún lugar de su longitud. En este caso, la red rota refleja luz en un ancho de banda reducido comprendido entre λ_1 y λ_3 .

Haciendo referencia a la figura 5, en otra forma de realización de la presente invención, se adhiere una serie de redes de Bragg 1a, 1b y 1c a un cuerpo B utilizando unos medios adecuados, por ejemplo, resina epoxi e. Cada red presenta un paso uniforme, pero la serie de redes presenta diferentes pasos y, en consecuencia, producen reflexiones espectrales centradas en diferentes longitudes de onda de Bragg. La detección de cualquier cambio en los espectros de reflectancia de la serie de redes permitirá detectar la formación de grietas en diferentes zonas del cuerpo (que pueden estar sustancialmente alejadas). Además, la observación de las magnitudes de los cambios en los respectivos espectros de reflectancia permitirá obtener información relativa a la localización precisa de las grietas dentro de estas zonas.

Haciendo referencia a la figura 6, en otra forma de realización de la presente invención, se graba un reflector de red de Bragg 1 en un cuerpo B. En esta figura, la red representada está intacta. Se suministra luz de una fuente de banda ancha 4 a la red, por medio del acoplador 2. En esta forma de realización, aunque la red no está rota, la segunda fuente de banda ancha 4(2) situada en el lado de "transmisión" nominal de la red está desactivada, o aislada de tal manera que

no puede suministrar luz a la red en dirección inversa (lo cual, por supuesto, impediría la medición de la señal R_0). Así pues, una señal de luz de banda ancha i_0 incide en la red 1. Una parte de esta señal de luz se refleja como una señal de reflectancia R_0 . Esta luz reflejada vuelve al acoplador, que desvía una parte r_0 hacia un analizador de espectros ópticos (OSA) 30. Entonces, la combinación de la fuente de banda ancha (que puede ser un LED) 4 y el OSA 30 puede formar el espectro de reflectancia de la red 1. Una parte de la luz suministrada a la red se transmite a través de esta, formando una señal T_0 transmitida, y una parte de esta señal se transmite a otro OSA 30 para medir el espectro de transmitancia de la red.

Las mediciones de transmisión se utilizan para normalizar las mediciones de la señal de reflectancia, es decir, para ofrecer una medida más adecuada de los cambios en la magnitud de la señal reflejada ocasionados por el agrietamiento de la red (en lugar de los ocasionados por cambios en los mecanismos de pérdida de la intensidad de salida de la fuente de banda ancha).

La figura 7 representa esquemáticamente el aparato de la figura 6 tras formarse una grieta C importante en el cuerpo B que provoca la separación de la red en una primera parte 11 y una segunda parte 12. La grieta es suficientemente grave como para impedir la transmisión de la luz desde la primera hasta la segunda parte. En este caso, la fuente de banda ancha 4 y el OSA 30 del lado de entrada nominal de la red se utilizan para medir el espectro de reflectancia de la primera parte 11. Puesto que la grieta impide la transmisión de luz desde la primera hasta la segunda parte, se utiliza una segunda fuente de banda ancha 4(2) situada en el lado de salida nominal de la red para enviar otra señal de luz I_{00} a la segunda parte 12 de la red. Esta señal de luz se transmite por medio de otro acoplador 2 y, por consiguiente, la señal recibida por la segunda parte 12 es la señal i_{00} . En este ejemplo, lo que permite realizar la medición de los espectros de reflectancia individuales de las dos mitades de la red es la envergadura de la grieta C. La segunda parte 12 genera una segunda señal reflejada R_2 , una parte de la cual r_2 se transmite al OSA 30 situado en el lado de salida nominal.

Por lo tanto, en esta forma de realización, la medición del espectro de reflectancia normalizada de la red intacta se utiliza para detectar la presencia de una grieta. Una vez que se ha formado una grieta, la segunda fuente de banda ancha 4(2) se utiliza (empleando un sistema de cambio adecuado) para iluminar la red desde el otro extremo, de tal forma que los espectros de reflectancia de ambas "mitades" puedan utilizarse para determinar la posición de la grieta con más precisión.

En esta forma de realización, los espectros de reflectancia de la red intacta y de la primera parte de la red medidos por el OSA en el lado de entrada se comparan para obtener una indicación de la posición de la grieta C a lo largo de la longitud de la red, y además se compara el espectro de transmisión de la red intacta con el espectro de reflectancia de la segunda parte 12 para obtener otra indicación de la posición de la grieta C. La utilización de estas medidas de extremos opuestos de la red permite determinar con más precisión la posición de la grieta C.

En la figura 8, se representa otra forma de realización de la presente invención que comprende un cuerpo B en el cual se ha grabado una red de Bragg en fibra. Se ha producido un desplazamiento en el cuerpo que ha provocado la escisión de la red de Bragg en una primera y una segunda parte 11 y 12 sin posibilidad de transmisión de luz entre estas. Los extremos de la primera y la segunda parte están conectados a un acoplador óptico de fibra común 2. Se suministra luz I de un láser sintonizable 41 controlado por un generador de rampa 42 a la entrada del acoplador. La salida del acoplador 2 se transmite a un detector de luz de banda ancha 3, que a su vez transmite una correspondiente señal de salida a un procesador 5. Antes de producirse el desplazamiento, cuando la red estaba intacta, la señal transmitida al procesador 5 desde el detector de luz de banda ancha 3 era sustancialmente uniforme a través de todo el rango de barrido del láser sintonizable. Esto es debido a que el detector de banda ancha recibía tanto los espectros reflejados como los transmitidos desde la red como consecuencia de un sistema cíclico.

Sin embargo, una vez que se produce el desplazamiento, no se dispone de ninguna señal transmitida, ni desde la primera parte hasta la segunda parte ni en sentido contrario. En este caso, la señal recibida por el detector de banda ancha 3 es una combinación de los espectros de reflectancia de la primera parte 11 y la segunda parte 12 (es decir, corresponde a r_{11} más r_{12}). El procesador recibe una señal de la fuente de luz, que comprende el generador de rampa 42 y el láser sintonizable 41, siendo dicha señal indicativa de la frecuencia de salida del láser sintonizable en cualquier momento determinado. Por lo tanto, el procesador es capaz de medir, por medio de la fuente de luz y el detector de luz, los espectros de reflectancia combinados de la primera y la segunda parte. El procesador está correctamente programado para ser capaz de determinar la presencia y la posición del desplazamiento a lo largo de la longitud de la red, a partir de los espectros de reflectancia combinados.

En otra forma de realización de la presente invención, se utilizan las propiedades de reflectancia espectral de una red de Bragg en fibra para localizar la posición de una rotura de fibra grabada en una muestra. En un primer intervalo de tiempo, se mide el espectro de reflectancia de la red. A continuación, se produce una distorsión del cuerpo que rompe la fibra dentro de la zona de la red. En realidad, se dispone entonces de dos redes de Bragg, cada una de las cuales tiene por lo general una longitud diferente. En esta forma de realización, se miden los espectros reflejados durante la reflexión de una de estas redes. En otra forma de realización, se miden los espectros reflejados de ambas redes. Cada uno de los espectros de las dos "mitades" de la red presenta una forma distinta a la de la red intacta. Normalmente, los espectros de las partes más cortas son más anchos y presentan una reflectividad máxima inferior (debido a que las redes son más cortas que la red intacta original). En esta forma de realización, se realiza un análisis de uno de los espectros, obteniéndose información para calcular la posición de la rotura de la fibra con cierta precisión.

ES 2 337 555 T3

En una forma de realización alternativa, ambos espectros se miden y se analizan, con lo cual se obtiene información redundante y, por consiguiente, se reducen las imprecisiones en la localización de la grieta.

Es evidente que las ventajas de las formas de realización de la presente invención comprenden el hecho de determinar la localización de la grieta dentro de la longitud de la red, lo cual, suponiendo que la localización inicial de la red sea precisa, es potencialmente más exacto que las mediciones realizadas a lo largo de la longitud de la fibra necesarias para la OTDR, por ejemplo.

Existen modelos informáticos que permiten resolver el problema inverso de la determinación de los parámetros de la red a partir de los espectros medidos. Dichos modelos informáticos pueden utilizarse en las formas de realización de la presente invención (citadas anteriormente).

Como resultará obvio, los procedimientos y aparatos de medición descritos pueden tener una aplicación particular en la industria aerospacial (por ejemplo, en la supervisión de motores de aviación o estructuras compuestas), en ingeniería mecánica, en pruebas de materiales y en ingeniería civil (por ejemplo, en la supervisión de grietas en presas de hormigón). Evidentemente, también son posibles otras aplicaciones.

Por lo que respecta a las fuentes de banda ancha mencionadas en la descripción anterior, resultará evidente que es posible utilizar LED y que son igualmente aplicables otras formas de fuentes de banda ancha. Existen en el mercado analizadores de espectros ópticos adecuados para medir los espectros de reflectancia o transmitancia, que habitualmente se basan en redes de difracción con el fin de medir las características espectrales de las fuentes u otros componentes ópticos. La resolución normal de un analizador de espectros ópticos es de aproximadamente 0,05 nm. No obstante, si se utiliza un láser sintonizable controlado por un generador de rampa, se obtiene una mejor resolución. Los espectros también se pueden medir utilizando sistemas de filtros de barrido y técnicas de filtros de borde.

Aunque la descripción y las reivindicaciones se refieran a señales, características y espectros “ópticos”, debe tenerse en cuenta que es posible utilizar señales de otras longitudes de onda, que tal vez no estén comprendidas dentro de los rangos de longitudes de onda o frecuencias atribuidas comúnmente a las señales ópticas. Dicho de otro modo, es posible utilizar redes de Bragg (por ejemplo, reflectores) cuyas longitudes de onda de Bragg se hallan fuera de los espectros visibles u ópticos, a condición claro está de que se utilicen fuentes y detectores de radiación electromagnética adecuados para medir las características de reflectancia o transmitancia. Por ejemplo, pueden utilizarse redes que reflejen en la zona de las microondas.

Cuando las mediciones de las características de las dos mitades de una red rota se utilizan para determinar la posición de la grieta o rotura, uno de los sistemas que se pueden emplear consiste simplemente en calcular el promedio de los resultados.

Los acopladores adecuados para utilizar en las formas de realización descritas anteriormente se pueden denominar “acopladores 2 x 2”.

Debe tenerse en cuenta que para ofrecer una detección de grietas fiable es importante que la red de Bragg esté correctamente adherida o fijada de alguna forma a la muestra o grabada en esta. Con este propósito, pueden aplicarse revestimientos a la red. No es deseable que las grietas se propaguen a lo largo del tramo de la red o a lo largo de la zona de contacto entre la red y el material del cuerpo.

Los reflectores de red de Bragg pueden tratarse de alguna forma para que, por ejemplo, sus propiedades mecánicas coincidan sustancialmente con las del cuerpo en el que deben grabarse. De forma adicional o alternativa, los reflectores pueden someterse a fragilización para que no refuercen el cuerpo que se desea supervisar.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para detectar grietas o fracturas en un cuerpo, comprendiendo el procedimiento las etapas si-
guientes:

adhesión o empotrar una red de Bragg (1) a la superficie de un cuerpo (B) o en el cuerpo (B), respectivamente y
medir las características de reflectancia y/o transmitancia de la red de Bragg (1);

caracterizado porque comprende

transmitir una grieta (C) o fractura en el cuerpo (B) a la red de Bragg (1) para romper la red de Bragg (1) en una
primera parte y una segunda parte y

detectar la presencia de la rotura de la red de Bragg (1) mediante la detección de un cambio resultante en las
características de reflectancia y/o transmitancia de la red de Bragg (1).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además la etapa de determinación, a partir de dicho
cambio resultante, de la posición de la rotura de la red de Bragg (1) a lo largo de su longitud.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que dicha etapa de medición comprende
la etapa de medición del espectro de reflectancia óptica de la red intacta, y dicha etapa de detección de un cambio
resultante comprende la etapa de medición del espectro de reflectancia óptica de la primera parte.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, que comprende además la etapa de medición del espectro de reflectan-
cia óptica de la segunda parte.

5. Procedimiento según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en el que dicha etapa de detección de un cambio
resultante comprende la etapa de comparación de las respectivas intensidades y/o anchuras máximas de los espectros
de reflectancia óptica.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en el que la etapa de determinación de la posición
de la rotura comprende la etapa de comparación de las respectivas intensidades y/o anchuras máximas de los espectros
de reflectancia óptica.

7. Procedimiento según la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en el que la red de Bragg (1) presenta un paso
eficaz sustancialmente uniforme, y la etapa o las etapas de comparación comprenden cada una la etapa de comparación
de las intensidades máximas (I_0) y/o las anchuras máximas de los respectivos picos centrales de los espectros de
reflectancia óptica.

8. Procedimiento según la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en el que la red de Bragg (1) es modulada pulsada,
y la etapa o las etapas de comparación comprenden cada una la etapa de comparación de los respectivos anchos de
banda de los espectros de reflectancia óptica.

9. Procedimiento según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, que comprende además las etapas de determina-
ción, a partir de los espectros de reflectancia, de por lo menos un parámetro de la red intacta y la red rota utilizando
técnicas analíticas, comprendiendo dicho por lo menos un parámetro la longitud de la red y/o el número de planos de
reflexión, en el que la etapa de detección de la presencia de la rotura comprende la etapa de comparación de dicho
parámetro o parámetros determinados.

10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que dicha etapa de determinación de la posición de la rotura
comprende la etapa de comparación de dicho parámetro o parámetros determinados.

11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha etapa de medición de las
características de reflectancia y/o transmitancia comprende las etapas de suministro de luz a la red de Bragg a partir
de una fuente de banda ancha, y de detección del espectro de reflectancia o transmitancia utilizando un analizador de
espectros ópticos.

12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que la etapa de detección del cambio resultante comprende
las etapas de utilización de la fuente de banda ancha y el analizador de espectros ópticos para medir el espectro de
reflectancia o transmitancia de la red rota.

13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que la etapa de medición de las caracte-
rísticas de reflectancia y/o transmitancia comprende las etapas siguientes:

suministrar luz a la red de Bragg (1) desde un láser sintonizable;

ES 2 337 555 T3

controlar láser para efectuar el barrido de las longitudes de onda de la luz suministrada a través de un rango;

detectar la luz reflejada o transmitida por la red intacta mediante un detector de banda ancha.

5

14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que la etapa de detección del cambio resultante comprende las etapas de utilización del láser sintonizable y el detector de banda ancha para medir un espectro de reflectancia o transmitancia de la red rota.

10

15. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la red de Bragg (1) es una red de Bragg en fibra.

15

16. Procedimiento según la reivindicación 15, que comprende además la etapa de revestimiento de la red de Bragg en fibra para mejorar la transmisión de la grieta o fractura a la red.

17. Procedimiento según la reivindicación 15 o la reivindicación 16, que comprende además la etapa de fragilización de la red de Bragg en fibra.

20

18. Aparato para detectar una grieta (C) o fractura en un cuerpo (B), que comprende:

una red de Bragg (1) para adherirse a una superficie del cuerpo (B) o empotrarla en el mismo y

25

una fuente de luz y un detector de luz para medir un espectro de reflectancia y/o transmitancia de la red de Bragg (1);

caracterizado porque comprende

30

un procesador (5) dispuesto para detectar una rotura a lo largo de la longitud del reflector de red de Bragg, detectando un cambio en el espectro de reflectancia y/o transmitancia.

35

19. Aparato según la reivindicación 18, en el que el procesador (5) está dispuesto además para determinar la posición de la rotura a lo largo del tramo de red de Bragg a partir de mediciones de los espectros de reflectancia y/o transmitancia antes y después de la rotura.

20. Aparato según la reivindicación 18 o la reivindicación 19, en el que la fuente de luz comprende una fuente de banda ancha y el detector comprende un analizador de espectros ópticos.

40

21. Aparato según la reivindicación 18 o la reivindicación 19, en el que la fuente de luz comprende un láser sintonizable y el detector comprende un detector de banda ancha.

45

22. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones 18 a 21, en el que la red de Bragg es una red de Bragg en fibra.

23. Aparato según la reivindicación 22, en el que la red de Bragg en fibra está revestida para facilitar su adhesión al cuerpo.

50

24. Aparato según la reivindicación 22 o la reivindicación 23, en el que la red de Bragg en fibra está fragilizada.

55

60

65

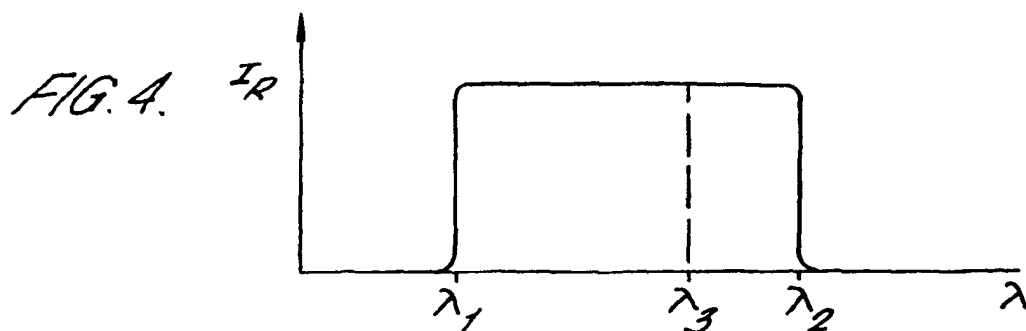
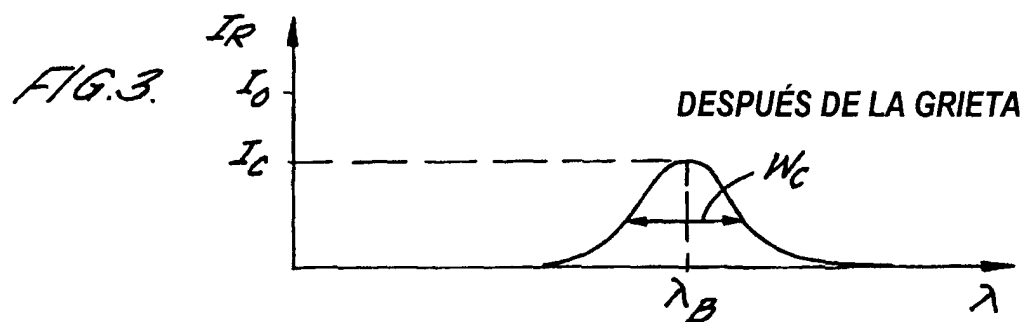
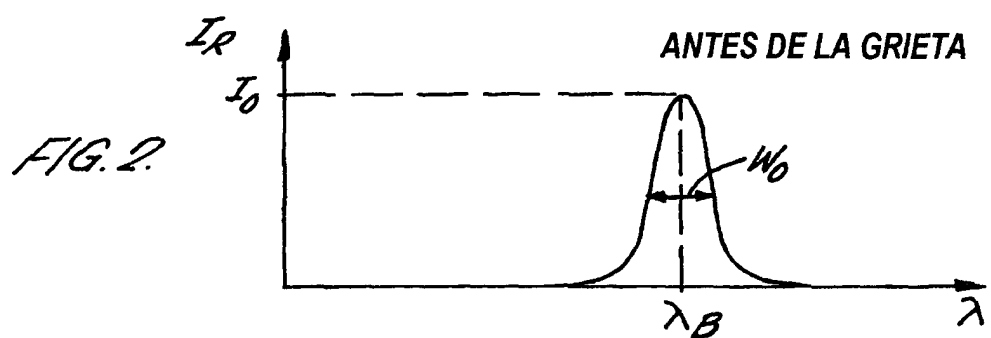
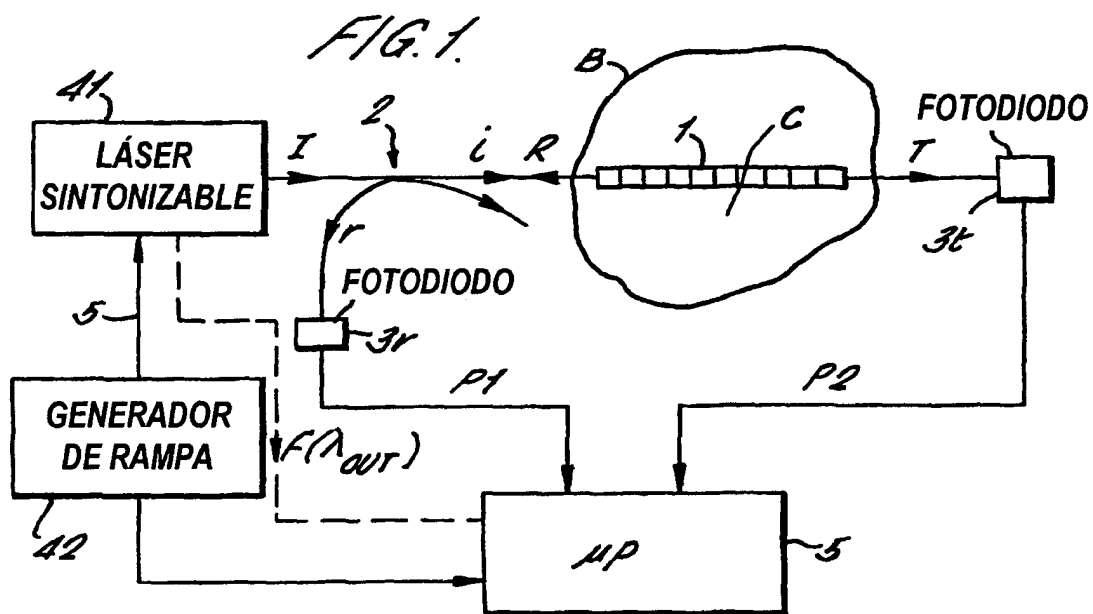


FIG 5

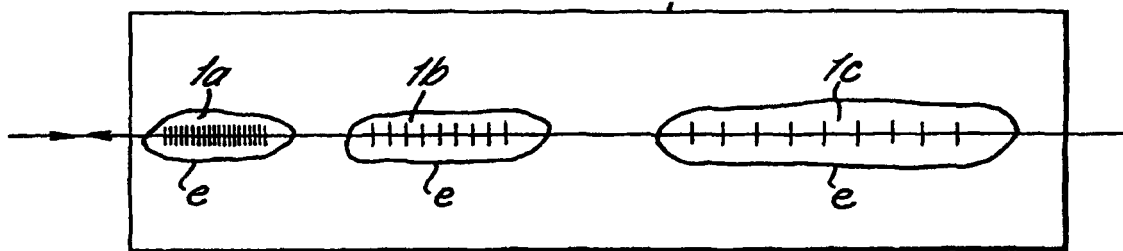


FIG. 6.

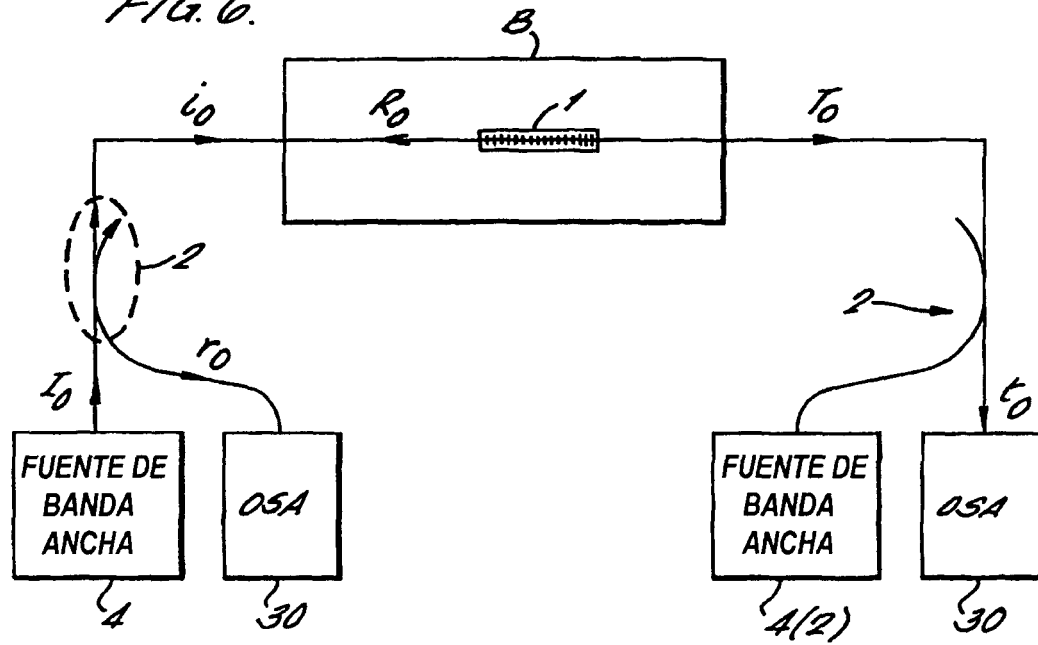


FIG. 7.

