

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 773 545**

51 Int. Cl.:

**G01M 5/00** (2006.01)  
**G01N 29/07** (2006.01)  
**G01N 29/24** (2006.01)  
**G01N 21/17** (2006.01)  
**G01M 11/08** (2006.01)  
**G01N 29/06** (2006.01)  
**G01D 5/353** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.11.2014 PCT/EP2014/075763**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.06.2015 WO15082292**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.11.2014 E 14803131 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020 EP 3077795**

54 Título: **Control de estructura industrial**

30 Prioridad:

**02.12.2013 FR 1361916**

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

**13.07.2020**

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%)  
25, Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"  
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**CHAPUIS, BASTIEN**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

**ES 2 773 545 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

Control de estructura industrial

**Campo de la invención**

5 La invención se refiere al campo de la metrología y, en particular, al control de la salud de las estructuras por medio de fibras ópticas.

**Estado de la técnica**

El control de la integridad de las estructuras (obras de ingeniería, aviones o tuberías, por ejemplo) durante su vida se realiza generalmente durante las operaciones de mantenimiento, con inspección e intervención humana. Un problema técnico concreto consiste, por ejemplo, en detectar y dimensionar una zona corroída en el fuselaje de un avión.

10 Para estos controles de integridad, generalmente se utilizan los llamados procedimientos de control no destructivo (CND), según los llamados procedimientos "convencionales" (por ultrasonidos, según procedimientos electromagnéticos, etc.).

15 Desde hace unos años, existen desarrollos de investigación que tienen como objetivo integrar sensores en la estructura en puntos clave de las estructuras, esto para automatizar las mediciones (por ejemplo, a intervalos regulares, siendo estos intervalos generalmente cercanos en el tiempo) y poder acceder a información sobre el estado de salud de ciertas zonas inaccesibles, sin desmantelamiento o interrupción del funcionamiento de la estructura. En general, estos desarrollos tienen como objetivo alargar los intervalos de mantenimiento y, por lo tanto, ahorrar dinero.

20 En particular, ciertas investigaciones prevén el uso de ondas ultrasónicas guiadas (OG) emitidas y detectadas por transductores piezoeléctricos (por ejemplo, de tipo PZT) integrados en la estructura. Estas ondas guiadas se propagan a lo largo de una gran distancia (de unas pocas decenas de cm a unos cientos de metros en geometrías muy favorables como tuberías), de modo que un número limitado de transductores permite controlar una zona grande. Se pueden utilizar otras tecnologías para emitir y/o detectar ondas ultrasónicas guiadas (además de fibras ópticas, películas de PVDF o sensores magnetostrictivos, por ejemplo).

25 Un problema técnico general radica en encontrar un compromiso aceptable entre el número de sensores a integrar (coste, volumen, peso, etc.) y la calidad de la información recuperable por estos sensores. Un número elevado de sensores significa un coste elevado y un número bajo de sensores a menudo implica una falta de fiabilidad de la información, riesgos de falsas alarmas o incluso falta de redundancia en caso de fallo de un sensor. Sin embargo, la multiplicación de sensores plantea otros problemas específicos (por ejemplo, cada sensor integrado puede constituir un punto adicional de fragilización, lo que podría provocar nuevos defectos en la estructura). Para cada sensor, también es necesario proporcionar cables de suministro eléctrico, lo que no siempre es posible. En la práctica industrial, muy pocas aplicaciones proporcionan un compromiso satisfactorio.

30 En cuanto a la naturaleza de los sensores, las soluciones conocidas del estado de la técnica que utilizan láseres como sistemas de medición no son utilizables en todas las circunstancias. En particular, los láseres no pueden integrarse en las estructuras.

35 Ciertos enfoques conocidos consisten en llevar a cabo una medición de referencia de la estructura en estado sano para constatar una diferencia con un estado posterior para revelar la presencia del defecto. Para hacer que esta operación sea más fiable, existen diferentes técnicas de procesamiento de señales, en particular para compensar la influencia de la temperatura, pero ninguna es realmente eficaz. En todos los casos, la interpretación de las señales sigue siendo muy delicada.

40 El documento de patente US6285806 divulga una red de sensores de fibra óptica que consta de varios segmentos. Los segmentos están separados por reflectores débiles tales como mallas reticulares de Bragg con fibras ópticas. La luz proveniente de una fuente de luz se introduce en el extremo de entrada de la malla reticular. La luz reflejada por cada uno de los reflectores tiene un desfase que representa los efectos de la condición física en todos los segmentos, desde la entrada a este reflector. Para abordar un reflector específico, la luz de retorno se demultiplexa. Esta demultiplexación se realiza modulando la entrada de luz en el extremo de entrada de la malla reticular con una secuencia de bits pseudoaleatoria y correlacionando la salida con una versión desfasada en el tiempo de la secuencia de bits pseudoaleatoria para aislar la parte de la salida causada por este reflector. Para abordar un segmento específico, se determinan los desfases de dos reflectores adyacentes. La luz de retorno puede reforzarse mezclándola con parte de la luz captada por la fuente luminosa.

50 Los diferentes aspectos de la invención palían estos inconvenientes, al menos en parte.

**Sumario de la invención**

Ciertos modos de realización de la invención proporcionan ventajosamente el uso de mallas reticulares de Bragg, en particular "sensores FBG" o "detectores FBG" o "puntos de medición FBG", siendo "FBG" el acrónimo de la expresión inglesa "*Fiber Bragg Grating*".

Una malla reticular de Bragg (o reflector Bragg distribuido) es un reflector de calidad utilizado en guías de onda, por ejemplo, en fibras ópticas. Se trata de una estructura en la que se alternan capas de dos materiales con diferentes índices de refracción, lo que provoca una variación periódica del índice de refracción efectivo en la guía. Una malla reticular de Bragg es una modulación submicrométrica del índice de refracción del núcleo de la fibra: una malla reticular de unos pocos milímetros consta, de este modo, de varios miles de pasos. Desde un punto de vista funcional, desempeña el papel de un reflector para una banda espectral fina centrada en una longitud de onda característica proporcional al paso y al índice del núcleo de la fibra. De este modo, cualquier modificación de estos parámetros desplaza la longitud de onda de Bragg proporcionalmente. El seguimiento de sus desplazamientos espectrales permite volver a los parámetros inductores, como la temperatura o las deformaciones sufridas localmente por la fibra óptica. Estas mallas reticulares de Bragg son producidas por láser dentro del núcleo de fibras monomodales. La inscripción de estas mallas reticulares puede realizarse en concreto por insolación transversal con una figura de interferencia creada por dos rayos láser.

Según un modo de realización, se divulga un procedimiento de análisis de una estructura mediante correlación de campo difuso, según la reivindicación 1, una fibra óptica que consta de una pluralidad de puntos de medición, constando un punto de medición de sensores de tipo malla reticular de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG), desplegándose la fibra óptica "en" (por ejemplo, "colocada a posteriori" o "integrada de forma nativa en") o "sobre" (por ejemplo, "colocada sobre" o "unida" o "asociada con") la estructura a analizar, comprendiendo el procedimiento la emisión de luz en la fibra óptica; y la medición por correlación para al menos una parte de los pares de sensores FBG del campo acústico-elástico propagándose "en" (o "en el interior de", "a través de", "por") la estructura. Los sensores o pares de sensores FBG son interrogados de manera sustancialmente simultánea. Mediante el término "sustancialmente", se hace referencia a la velocidad de las ondas elásticas y al hecho de que los interrogatorios se producen metrológicamente en un delta de tiempo (intervalos de tiempo cercanos para obtener mediciones significativas desde el punto de vista de la propagación de las ondas elásticas en la estructura). Todos o parte de los sensores pueden ser interrogados, según diversas implementaciones. De una manera no reivindicada, un subconjunto de sensores puede ser interrogado de manera sustancialmente simultánea, mientras que otro subconjunto puede ser objeto de una interrogación retardada (por ejemplo, secuencialmente o en paralelo por pares o incluso combinamos estos modos de interrogación, por rotación, etc.). El campo acústico-elástico designa el campo de las ondas mecánicas (sónicas, ultrasónicas, etc.) que se propagan en un medio sólido. A diferencia del caso del fluido, existen dos tipos de ondas acústicas para un material sólido. Estas ondas se conocen mejor como ondas elásticas (cizallamiento y compresión-tracción). El efecto acústico-elástico refleja una dependencia de la velocidad de propagación de las ondas acústicas en función del estado de deformación del sólido. La estructura a analizar no consta de restricciones particulares en la medida en que cualquier tipo de estructura (en particular industrial) puede ser analizada por los procedimientos y sistemas descritos en el presente documento.

En un desarrollo, el procedimiento comprende además una etapa de reconstrucción de las velocidades de propagación por tomografía, realizándose la imagenología por inversión de todos los tiempos de vuelo entre los sensores FBG, siendo cada tiempo de vuelo para cada par de sensores FBG deducido de la medición de correlación. Este desarrollo es opcional. Presenta la ventaja de una interpretación posterior mejorada.

En un desarrollo, la posición en el espacio de cada punto de medición se mide previa e individualmente. Esta solución presenta la ventaja de su simplicidad de implementación.

En un desarrollo, se mide la temperatura de la estructura y se compensa una variación de tiempo de vuelo inducida por un cambio de temperatura. La temperatura puede influir, en efecto, sobre los tiempos de vuelo y es importante poder corregir o compensar los efectos térmicos. Concretamente, se puede utilizar un termopar, pero son posibles otros procedimientos de medición.

En un desarrollo, la imagenología de la estructura por tomografía se realiza por medición de al menos dos tiempos de vuelo, realizándose una primera medición en un estado inicial o de referencia y realizándose una segunda medición en un estado posterior (para los mismos pares de puntos de medición). El estado posterior se denomina "actual", por lo tanto, corresponde al tiempo presente de la medición ("segundo conjunto de medición").

La realización de una tomografía (totalmente opcional) sobre los datos resultantes de la primera medición permite en particular identificar ciertas particularidades geométricas de la estructura. Esto corresponde a una medición estática realizada en el estado inicial (o de referencia). La imagenología de la estructura en reposo se puede sustraer eventualmente de imágenes posteriores de la estructura (sustracción de píxeles, es decir, en términos de contenido de la imagen). En otras palabras, este mapeo opcional permite identificar ciertas particularidades geométricas de la estructura para no confundirlas con defectos en los mapeos obtenidos en el segundo conjunto de medición.

En un desarrollo, el procedimiento comprende además una segunda medición realizada en un estado posterior para los mismos pares de puntos de medición que la primera medición y comprende además un mapeo por tomografía de las variaciones de velocidades de propagación en la estructura entre el estado inicial y el estado posterior obtenidos a partir de las diferencias en los tiempos de vuelo medidos entre los dos estados. En otras palabras, se procede a la medición de la variación en los tiempos de vuelo (medidos para los pares) entre los dos estados. Esto permite obtener, por tomografía, un mapeo de las variaciones en la velocidad de propagación de las ondas elásticas (elástico-acústicas) entre el instante de la medición asociada con el estado actual (presente) y el instante asociado con el estado de

referencia. Por ejemplo, entre el instante  $t$  de la medición y el instante inicial  $t_0$ , se podrá constatar que las ondas van "más lentamente" (respectivamente "más deprisa") en ciertos lugares y deducir de ello la identificación de los defectos o daños causados a la estructura.

5 En un desarrollo, un punto de medición incluye un sensor FBG. La utilización de un sensor de este tipo para realizar la correlación de campo difuso no se ha descrito a priori. En otro desarrollo, un punto de medición comprende tres sensores FBG receptores y direccionales dispuestos sustancialmente a  $120^\circ$  entre sí en una configuración llamada de roseta. La configuración de roseta es el compromiso que minimiza el número de elementos materiales al tiempo que garantiza una buena calidad de la medición. Un punto de medición también puede incluir cualquier número de sensores FBG (por ejemplo, 5 sensores, 6 sensores, etc.).

10 En un desarrollo, la medición por correlación comprende una correlación de coda de correlaciones entre sensores FBG. Este desarrollo completamente opcional optimiza el dispositivo, ya que facilita la disposición de la fibra óptica sobre la estructura. Como consecuencia, se pueden reducir los tiempos necesarios para la instalación, se minimizan los errores de situación de los puntos de medición, etc. La "correlación de coda de correlaciones" consiste, para un par de puntos de medición A y B, en elegir cualquier punto de medición cualquiera  $C_i$  seleccionado del conjunto de puntos de medición (excepto A y B); en correlacionar las mediciones para cada uno de los puntos A y B con este punto de medición cualquiera  $C_i$ ; en correlacionar la coda de estas correlaciones para obtener la correlación entre los puntos de medición A y B. Es posible repetir la operación para una parte o todos los posibles puntos de medición  $C_i$  y sumar las correlaciones obtenidas para obtener una correlación entre A y B con mayor fiabilidad. Todo esto se puede aplicar a todos o parte de los posibles pares de sensores FBG.

20 En un desarrollo, se divulga el uso de una pluralidad de fibras ópticas, constanding cada una (al menos parcialmente de sensores FBG). Las implementaciones en la práctica pueden variar. Cada sensor o pareja o par de sensores puede ser interrogado por separado. También se divulga un sistema para el análisis de una estructura, según la reivindicación 11, que comprende al menos una fibra óptica que consta de una pluralidad de puntos de medición, constanding un punto de medición de uno o más sensores de tipo malla reticular de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG); una fuente de luz acoplada a la fibra óptica; un fotodetector o un analizador de espectro óptico para analizar la luz reflejada después de su recorrido en la fibra óptica; y medios de procesamiento de la señal para realizar cálculos de correlación y de tomografía.

25 En un desarrollo, la fuente de luz es un láser, cuya longitud de onda se hace variar, o una fuente óptica de banda ancha, cuyo espectro óptico reflejado se determina. Los láseres ahora son comunes y las mediciones asociadas son eficaces.

30 En un desarrollo, las fibras ópticas pueden multiplexarse por medio, por ejemplo, de circuladores ópticos y/o analizadores de espectro y/o multiplexores.

35 En un desarrollo, los sensores unidireccionales de tipo FBG se complementan o reemplazan por sensores omnidireccional de tipo (*Doppler effect-based Fiber Optic*, FOD). Por lo tanto, todos los sensores pueden ser de tipo FBG, o todos de tipo FOD, o incluso el procedimiento puede implementarse en un sistema que comprende los dos tipos de sensores simultáneamente (en proporciones variables, frente a aspectos económicos y de rendimiento).

40 En un desarrollo, el sistema comprende además una o más fuentes de ruido activas situadas en o sobre la estructura para obtener un campo acústico-elástico difuso, es decir, que respeta mejor las características de un campo difuso. En un modo de realización, dicha colocación o situación es guiada interactivamente por las mediciones en curso. En otro modo de realización, la ubicación de las fuentes de ruido es determinada teóricamente (es decir, "predeterminada"). En otro modo de realización, se devuelve una indicación en cuanto a la adecuación de dicha situación (frente a la hipótesis del campo difuso). En otra realización, la multiplicidad de puntos o fuentes de ruido (combinado con colocaciones realizadas de manera aleatoria) tiende a garantizar que se obtenga un campo difuso (sin bucle de retroalimentación, es decir, a priori). En otras palabras, se divulga un sistema que comprende una o más fuentes de ruido activas que pueden utilizarse como complemento o como reemplazo de las fuentes naturales de ruido presentes en la estructura, lo que también puede ser ventajoso para la calibración. Estas fuentes adicionales pueden ser, por ejemplo, transductores piezoeléctricos colocados juiciosamente en la estructura, para poder realizar mediciones cuando se desee (por ejemplo, en un avión si las fuentes naturales son las turbulencias en vuelo, se usarán ventajosamente fuentes activas adicionales para poder realizar una medición en tierra, cuando ya no hay ningún ruido "natural" en la estructura). Estas fuentes se colocarán ventajosamente de tal manera que se cree un campo acústico que respete mejor la condición de distribución equitativa en energía. Por ejemplo, para satisfacer esta condición, las fuentes se pueden colocar cerca de difusores naturales (o incluso alrededor de la zona a controlar). Es posible utilizar fuentes activas integradas en la estructura. También es posible utilizar fuentes activas que no están integradas en ella: por ejemplo, un chorro de aire comprimido cuya zona de contacto barre aleatoriamente la estructura a examinar (para satisfacer la condición de distribución equitativa en energía). Por lo tanto, el sistema puede comprender al menos una fuente de ruido, siendo dicha fuente, por ejemplo, un chorro de aire comprimido, cuya zona de contacto barre aleatoriamente la estructura.

55 En un desarrollo, una fuente de ruido activa puede ser un transductor piezoeléctrico, eventualmente de tipo PZT.

Según un aspecto de la invención, se utiliza ventajosamente un gran número de puntos de medición en combinación con una medición por correlación del campo difuso, algo que nunca se ha hecho con sensores FBG, para realizar una tomografía.

5 Según un modo de realización particular de la invención, la estructura a examinar se somete a "imagenología". Esta imagenología permite interpretaciones más fáciles que las resultantes del análisis de señales sin procesar, ya que las singularidades geométricas de la estructura aparecen en forma visual y no se confunden con un defecto. En determinados modos de realización, el estado de referencia ya no es necesario.

10 Las estructuras industriales son a menudo muy complejas geoméricamente (debido a piezas de refuerzo, remaches, encoladuras, ...) y, en consecuencia, aparecen una multitud de ecos ultrasónicos. Por lo tanto, la imagenología ayuda considerablemente en la interpretación de las señales.

Por otra parte, una multiplicidad de sensores aumenta la resolución de la imagenología y, por lo tanto, refuerza las ventajas de la invención.

15 Ventajosamente, el volumen del aparato según la invención sigue siendo limitado, incluso con numerosos sensores, lo que permite portabilidad, compatibilidad y utilidad relativas con respecto a las limitaciones de un sistema integrado de control de la salud de estructuras (*Structural Health Monitoring, SHM*)

Las mediciones se realizan de forma pasiva, es decir, sin emisión de ondas acústicas. Como consecuencia, el consumo de energía se reduce y permite soluciones embarcadas (por ejemplo, a bordo de un avión, un barco o en el fondo del mar).

20 El procedimiento produce un mapeo fácilmente interpretable de la zona a controlar (lo que limita los riesgos de falsas alarmas). El procedimiento es aún más eficaz cuanto más difuso es el campo acústico, es decir que los elementos geométricos difractan varias veces el campo acústico, lo que es particularmente cierto en estructuras industriales que nunca son placas simples, sino que incluyen, por ejemplo, piezas de refuerzo, remaches o incluso sobreespesores locales que difractan las ondas y refuerzan el carácter difuso del campo.

25 El volumen es reducido, compatible con la integración del aparato en las estructuras a supervisar. Por ejemplo, para la integración en materiales compuestos, mientras que la utilización de transductores piezoeléctricos generalmente requiere dos cables eléctricos por transductor piezoeléctrico, una sola fibra óptica integrada entre las capas de materiales compuestos consta de decenas de puntos de medición. El número de puntos de entrada en la estructura es, por lo tanto, muy limitado, lo que limita aún más los posibles puntos de fragilización.

30 De este modo, la invención encontrará aplicación para operaciones de control integrado de la salud de estructuras (*Structural Health Monitoring, SHM*), como por ejemplo para la detección (y caracterización) de corrosión en el fuselaje de aviones, de delaminación en estructuras de material compuesto, de corrosión o depósitos en tuberías.

Las ventajas vinculadas a los modos de realización y al uso de fibras ópticas incluyen un volumen pequeño, una masa reducida, un gran ancho de banda, una gran inclinación, una inmunidad electromagnética, una buena resistencia a la radiación severa o ionizante, entre otros.

### 35 **Descripción de las figuras**

Se harán evidentes los diferentes aspectos y ventajas de la invención en apoyo de la descripción de un modo preferente, pero no limitante, de implementación de la invención, con referencia a las siguientes figuras:

La figura 1 muestra el esquema de un ejemplo de dispositivo según la invención;

La figura 2 ilustra otro ejemplo de configuración de los puntos de medición según la invención;

40 La figura 3 ilustra un ejemplo de medición de amplitud en función del ángulo de incidencia sobre un sensor;

La figura 4 ilustra un ejemplo de configuración de los sensores FBG según una forma denominada "de roseta".

La figura 5 ilustra otro ejemplo de configuración de la fibra óptica según la invención, dispuesta "en meandros";

La figura 6 ilustra un ejemplo para el cual los rayos acústicos son alterados por una zona corroída;

45 La figura 7 ilustra los posibles trayectos acústicos para una configuración de ejemplo con 16 sensores dispuestos de forma circular.

### **Descripción detallada de la invención**

50 La invención puede utilizar ventajosamente una gran cantidad de puntos de medición para poder realizar tomografía por ondas guiadas. Para ello, una o más fibras ópticas en las que están grabadas mallas reticulares de Bragg (FBG) están integradas en (o pegadas a) la estructura. Una sola fibra óptica puede constar de decenas de FBG y, por lo tanto, otros tantos puntos de medición. Por lo tanto, el volumen es reducido.

Sin embargo, los FBG solo pueden funcionar como un receptor de ondas guiadas, pero no como un transmisor. Los sistemas SHM actuales basados en FBG utilizan, por lo tanto, transductores piezoeléctricos además como transmisores. Para realizar la tomografía se necesitaría un transductor piezoeléctrico por FBG, por lo tanto, siempre hay una gran cantidad de transductores piezoeléctricos.

5 Según un modo de realización de la invención, se describe una técnica que permite proporcionar imágenes de estructuras de tipo industrial en zonas localizadas y/o de espesor limitado (geometría de tipo placa o tubo). Las imágenes pueden indicar, en concreto, las velocidades de propagación de las ondas guiadas. Según ciertas realizaciones de la invención, este suministro de imágenes se realiza de forma pasiva (es decir, sin emisión de ondas ultrasónicas por el sistema de a bordo).

10 El procedimiento comprende, en concreto:

- una medición de campo ultrasónico de manera pasiva, mediante una técnica de correlación del campo difuso, técnica derivada de la geofísica, y recientemente estudiada en el marco del control de salud integrado. Este tipo de medición nunca se ha realizado con fibras ópticas provistas de mallas reticulares de Bragg (FBG) como sensores. Ahora bien, resulta que las mallas reticulares de Bragg (FBG) permiten ventajosamente tener una gran

15 cantidad de puntos de medición.

- una imagenología de estructura por tomografía realizada por ondas guiadas y que explota la presencia de esta gran cantidad de puntos de medición. Dicha imagenología se conoce del estado de la técnica, pero únicamente con ayuda de mediciones "activas", es decir, mediciones que requieren el empleo de transmisores de ondas ultrasónicas (para placas o para tuberías),

20 La invención prevé el empleo de sensores FBG, en lugar de los transductores piezoeléctricos utilizados habitualmente en sistemas SHM.

La transición de transductores piezoeléctricos (por ejemplo, de tipo PZT) a sensores (o puntos de medición) FBG no es evidente ya que son dos tecnologías muy diferentes y no intercambiables. Los transductores piezoeléctricos pueden utilizarse al mismo tiempo como transmisores y como receptores, mientras que los FBG solo pueden usarse como

25 receptores. Por otra parte, los transductores piezoeléctricos son omnidireccionales, mientras que los FBG son direccionales. Finalmente, los montajes son específicos en ambos casos (eléctricos frente a ópticos). Los transductores piezoeléctricos y los FBG a menudo se presentan como complementarios (transductor piezoeléctrico en transmisión y FBG en recepción) y los sistemas SHM actuales basados en FBG utilizan, todos, transductores piezoeléctricos integrados en o colocados sobre la estructura con fibra óptica como transmisor de ondas acústicas.

30 La figura 1 muestra un posible esquema según un ejemplo de realización del dispositivo según la invención. En el ejemplo, el dispositivo está constituido por una fibra óptica 100 integrada en una estructura a estudiar (o pegada a su superficie) y que comprende una serie de mallas reticulares de Bragg (*FiberBragg Grating*, FBG), como por ejemplo el punto de medición FBG 101 o incluso FBG 102. Los puntos de medición están representados por pequeños rectángulos. La figura 4 detalla una posible configuración de un punto de medición mediante FBG (configuración llamada "de roseta"). Una misma fibra óptica comprende generalmente algunas decenas de puntos de medición FBG

35 por fibra o incluso algunas centenas. La fibra óptica está integrada o pegada o colocada o unida o asociada con la estructura.

Según otro modo de realización de la invención, se pueden utilizar varias fibras ópticas. En este caso, estas fibras son interrogadas por separado por medio de un multiplexor.

40 La fibra óptica 100 es acoplada por un acoplador 110 a una fuente de luz 120 (láser o banda ancha), que emitirá en la fibra, y a un fotodetector o un analizador de espectro óptico 130 que analizará la luz reflejada después de su recorrido en fibra óptica, conectado a su vez a una unidad de procesamiento digital 140. Los diferentes recorridos acústicos en la zona a inspeccionar 150 que pasan por el punto de medición FBG 101 y cada uno de los otros puntos de medición se ilustran mediante las trayectorias acústicas 160.

45 Existen al menos dos posibilidades para medir ondas guiadas utilizando puntos de medición FBG. Un primer modo de realización utiliza un láser, cuya longitud de onda se hace variar. Un segundo modo de realización utiliza una fuente óptica de banda ancha, cuyo espectro óptico reflejado se determina. El primer modo de realización presenta la ventaja de una sensibilidad mejorada. El segundo modo de realización presenta la ventaja de ahorrar costes.

Según variantes de realización, el acoplador 110 puede reemplazarse por un circulador óptico ("*circulator*" en inglés, no representado) y el analizador de espectro (equipo costoso) o el fotodetector 130 por FBG dispuestos en fibras ópticas. multiplexadas (configuración a veces llamada *High-Speed Optical Wavelength Interrogation System*). Existen otros sistemas para la implementación de fibras ópticas multiplexadas.

55 La figura 2 ilustra otro ejemplo de configuración de los puntos de medición según la invención. Los puntos de medición FBG (101, 102,...) se pueden disponer de varias maneras alrededor de la zona a inspeccionar 150. La figura 2 ilustra otra configuración espacial de la fibra óptica 100 que porta los FBG 101, 102, etc. Las diferentes configuraciones en términos de disposición y de número de puntos de medición solo están limitadas por las que resultan de la eficacia de

reconstrucción posterior, por medio del algoritmo de tomografía elegido para el defecto que se desea estudiar.

La figura 3 ilustra un ejemplo de medición de amplitud en función del ángulo de incidencia sobre un sensor. Las FBG en sí son sensores direccionales: la amplitud medida depende del ángulo de incidencia de la onda sobre el sensor (figura 3a). La fibra 100 comprende un sensor FBG 310 orientado según un ángulo alfa 304, expuesto a una onda según una dirección 301 (perpendicular 302): la amplitud es máxima (305) cuando el FBG está en el sentido de propagación de la onda y cero o mínimo (306) cuando es ortogonal al mismo (figura 3b).

Al estar las FBG grabadas en el eje de la fibra óptica, si la disposición presentada en las figuras 1 y 2 correspondía a la orientación real de las FBG, la amplitud medida sería prácticamente nula para todos los pares de FBG de interés, es decir, para aquellos cuya trayectoria acústica atraviesa el núcleo de la zona a inspeccionar. En un modo de realización particular de la invención, se utilizan sensores para fibra óptica de tipo omnidireccional (por ejemplo, de tipo "FOD" *Doppler effect-based fiber optic*) como complemento de sensores FBG). A modo de ejemplo y de manera no reivindicada, dichos sensores para fibra óptica de tipo omnidireccional pueden utilizarse como reemplazo de los sensores FBG.

En otro modo de realización, se utiliza una configuración denominada "de roseta", ilustrada en la figura 4. La figura muestra el detalle de la disposición de cada punto de medición, por ejemplo, el punto de medición FBG 101, estando los diferentes puntos de medición representados mediante rectángulos en las figuras 1 y 2. Cada punto de medición comprende tres mallas reticulares FBG dispuestas a 120° una de otra (FBG 1 401, FBG 2 402, FBG 3 403). Debido a esta configuración espacial, para cada par de puntos de medición, la correlación se lleva a cabo entre las dos FBG (una para cada punto de medición) que están mejor alineadas.

Según una variante ilustrada en la figura 5a, la fibra óptica 100 puede estar dispuesta según "meandros". En esta configuración, hay menos trayectos disponibles para la tomografía (solo aquellos para los cuales las FBG están relativamente bien alineadas, en la figura los trayectos marcados 501).

Para cada par (A, B) de puntos de medición en esta red, se realiza una correlación del campo acústico u medido simultáneamente durante un largo período en A y en B, por ejemplo, aplicando (existen otras posibilidades de cálculo):

$$C_{AB}(t) = \int u_A(t + \tau) \cdot u_B(\tau) d\tau.$$

Se establece que la correlación (en todo rigor su derivada) converge hacia la función de Green entre A y B si los diversos componentes del campo de ondas respetan la condición de distribución equitativa en energía (la distribución en fase y en amplitud de las ondas es aleatoria, la llamada hipótesis de "campo difuso"). La función de Green entre A y B es la grabación que se obtendría en A si una fuente emitiera un Dirac en B.

Las condiciones de distribución equitativa en energía se pueden obtener cuando las fuentes se distribuyen aleatoriamente en el medio o cuando el número y la distribución de las fuentes es limitada pero el medio es muy difuso. Demostraciones experimentales han mostrado que la convergencia se obtenía en intervalos de frecuencia interesantes para el SHM (es decir, desde kilohercios a unos pocos megahercios).

Por ejemplo, las fuentes de ruido natural en las estructuras industriales pueden ser aquellas asociadas con la capa límite turbulenta en la aeronáutica, el impacto de olas, las vibraciones inducidas por los motores en un barco o un flujo turbulento en un tubo.

Según una variante ilustrada en la figura 5b, la fibra óptica se puede disponer sin meandros particulares (lo que puede ser más fácil o factible en ciertas situaciones). Una forma de remediar esta geometría relativamente desfavorable consiste en proceder a la correlación de coda de correlaciones, lo que equivale a pasar, para cada par (A, B) de puntos de medición, por al menos un tercer punto de medición C, y en realizar las correlaciones  $C_{AC}$  y  $C_{BC}$  y después la correlación de la coda de estas dos señales para obtener  $C_{AB}$ , pudiendo repetirse esta etapa además para todos los puntos de medición C diferentes de A y B y después promediarse para mejorar la relación señal a ruido. Esta implementación requiere una disposición simplificada de la fibra, que ya no necesita meandros de la fibra para alinear mejor las FBG unas con respecto a otras (figura 5b). Como contrapartida, el tiempo de procesamiento de las señales es más largo. En la práctica, esto se hace de la siguiente manera: para el par considerado (A, B), se utiliza otro punto de medición  $C_i$  entre todos los puntos disponibles. Se correlacionan en un primer momento las señales medidas entre A y B, por un lado, y  $C_i$ , por otro lado. Una vez que se han realizado las correlaciones  $C_{iA}$  y  $C_{iB}$ , la coda de estas señales se correlaciona para obtener la correlación entre A y B. Al poder repetirse esto en una parte o todos los puntos de medición  $C_i$ , se pueden sumar todas las correlaciones obtenidas para obtener una mejor estimación de la función de Green entre A y B.

A partir de la función de Green obtenida por la correlación, se deduce la medición del tiempo de vuelo entre A y B. Repetida para todos los pares de receptores posibles, esta operación proporciona una gran cantidad de datos de tiempo de vuelo que pueden utilizarse para realizar una reconstrucción por tomografía de velocidad de propagación.

La figura 6 ilustra un ejemplo para el cual los rayos acústicos son alterados por una zona corroída 610 en una zona de estudio 150. En el ejemplo, ciertos rayos acústicos que pasan por los puntos de medición FBG 1 101 (generalmente FBG n) son alterados. Entre todos los trayectos posibles, solo aquellos que pasan por la zona corroída 610 (u otro

daño tal como una delaminación) se ven alterados (o afectados, véanse las líneas continuas en la ilustración), los otros trayectos no cambian (líneas de puntos)

5 El procedimiento de tomografía según la invención invierte todos los tiempos de vuelo medidos, para reconstruir un mapa de velocidades de propagación compatibles con todos los tiempos de vuelo. Para las ondas guiadas, al depender la velocidad de propagación del espesor de la estructura (por una relación conocida, es decir, las curvas de dispersión), este mapa de velocidad de propagación se puede transponer en un mapa de espesor si se busca detectar corrosión. Este procedimiento también funciona, por ejemplo, para detectar la delaminación de una estructura compuesta (ya que a nivel de la delaminación también se modifica la velocidad de las ondas guiadas).

10 El mapa que se obtiene es una imagen de la estructura. Esta imagen es interpretable: la extensión de la zona dañada se hace visible. Para daños por corrosión, por ejemplo, se hace posible, por lo tanto, conocer la extensión y el espesor residual. Como consecuencia, se puede evaluar la gravedad de los daños, para tomar medidas correctivas, llegado el caso.

15 Por lo tanto, la obtención de una imagen de la estructura permite detectar uno o más defectos, sin tener necesidad de sustraer la señal medida en un instante  $t$  de la medida en un instante  $t_0$ , estado de referencia para el cual se considera que la estructura está sana. La provisión previa de este estado de referencia implica muchas restricciones (por ejemplo, necesidad de construir una base de datos con mediciones a todas las temperaturas que la estructura tendría que sufrir, problemas en caso de envejecimiento de los sensores que conducen a falsas alarmas, etc.)

20 La figura 7 ilustra los posibles trayectos acústicos para una configuración de ejemplo con 16 sensores (de tipo 101) dispuestos de forma circular. La robustez del procedimiento presentado en este caso proviene del número de puntos de medición y, por lo tanto, del número de trayectos posibles. La figura 7 muestra la multiplicidad de trayectos acústicos 160 en el caso del empleo de 16 sensores o puntos de medición. Es posible utilizar cientos de sensores.

Son posibles diferentes modos de realización para implementar la tomografía, en particular con respecto a la calibración del procedimiento. La tomografía supone, en efecto, conocer con precisión la posición de la FBG.

25 Según un modo de realización, se procede a la medición de las posiciones individuales de los puntos de medición FBG.

30 Según otro modo de realización, se realiza una calibración justo después de la colocación de la fibra, a una temperatura controlada, para medir los tiempos de vuelo entre cada uno de los pares de FBG. Si se conoce la velocidad, lo que no siempre es el caso, es posible deducir la posición de las FBG con muy buena precisión. En su defecto, es posible medir el tiempo de vuelo de cada uno de los pares de sensores y mapear la variación en la velocidad de propagación con respecto al estado inicial. Conociendo la temperatura en el momento de la calibración, si se conoce la temperatura de la estructura con ayuda de un termopar integrado en el instante  $t$  se puede, además, compensar la variación de tiempo de vuelo inducida por la temperatura. En su defecto, la temperatura generalmente implica un efecto uniforme (aunque potencialmente anisótropo) mientras que un defecto generalmente tendrá un efecto localizado. Por lo tanto, los problemas mencionados anteriormente sobre el hecho de sustraer el estado de referencia son menos críticos que en las técnicas actuales y, sobre todo, se compensan con un gran número de puntos de medición.

35 Según otro modo de realización, se procede a un mapeo de la estructura en un estado sano (estado de referencia de la estructura). En este caso, no hay necesidad de sustraer las señales. Este mapeo en el estado sano proporciona una imagen que permite identificar ciertas particularidades geométricas (tales como remaches, por ejemplo) dentro de la zona a controlar para no identificarlos como defectos durante mapeos siguientes.

40 Según una variante completamente opcional, se realiza una tomografía de atenuación. La correlación permite reconstruir no solo la fase de la función de Green sino también su amplitud. A continuación, se puede realizar una tomografía de atenuación. La convergencia de la correlación será diferente y la directividad de las FBG se puede compensar. Esta configuración es ventajosa en ciertas situaciones, en particular cuando el defecto que se busca estudiar tiene poca influencia en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas.

45 Según un desarrollo de la invención, se puede realizar la correlación entre dos FBG situadas en la misma fibra. Según otro desarrollo, se utilizan varias fibras ópticas, con correlación entre dos FBG diferentes situadas en fibras diferentes.

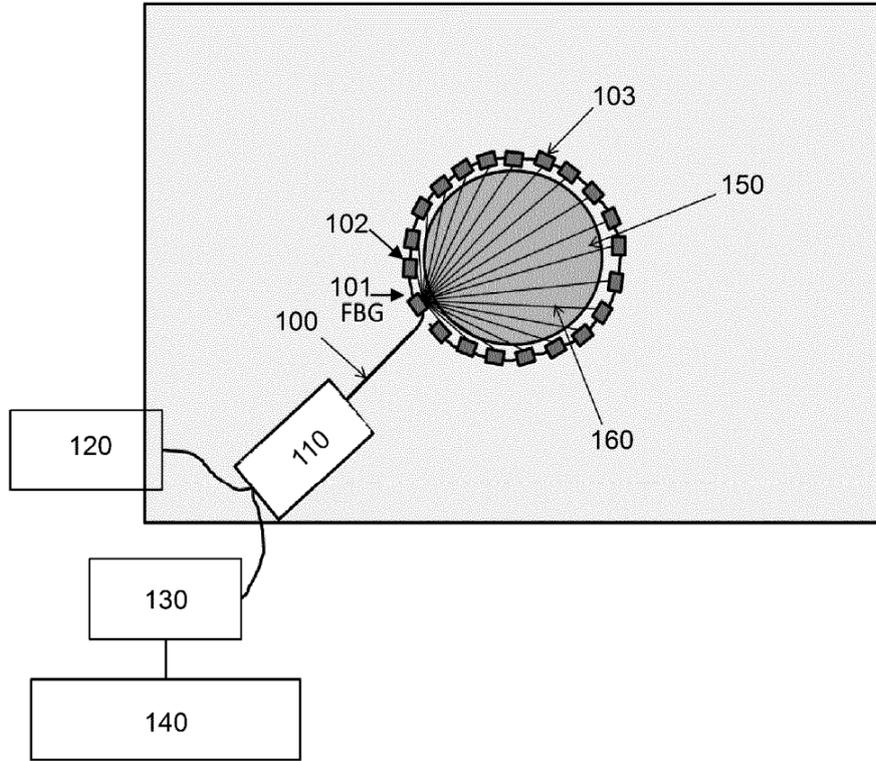
La presente invención puede implementarse a partir de elementos de hardware y/o software. Puede estar disponible como un producto de programa de ordenador en un soporte legible por ordenador. El soporte puede ser electrónico, magnético, óptico o electromagnético.

**REIVINDICACIONES**

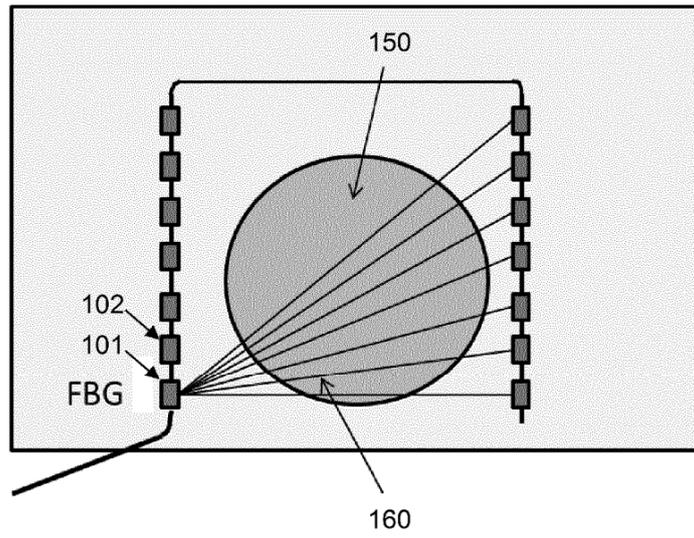
- 5 1. Procedimiento de análisis de una estructura por correlación de campo acústico-elástico difuso, una fibra óptica que consta de una pluralidad de puntos de medición, constando un punto de medición de uno o más sensores de tipo malla reticular de Bragg, desplegándose la fibra óptica en o sobre la estructura a analizar, comprendiendo el procedimiento las etapas que consisten en:
- emitir luz en la fibra óptica;
  - interrogar de manera sustancialmente simultánea al menos una parte de pares de sensores de tipo malla reticular de Bragg que miden a lo largo del tiempo las ondas acústico-elásticas en los puntos de medición;
  - 10 - determinar, por correlación de las señales acústico-elásticas, para al menos una parte de los pares de sensores de tipo malla reticular de Bragg, la función de Green de la estructura.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además una etapa de reconstrucción de las velocidades de propagación de las ondas acústico-elásticas por tomografía, realizándose la imagenología por la inversión de todos los tiempos de vuelo entre los sensores de tipo malla reticular de Bragg, siendo cada tiempo de vuelo para cada par de sensores de tipo malla reticular de Bragg deducido de la medición de correlación.
- 15 3. Procedimiento según la reivindicación 2, para el cual la posición en el espacio de cada punto de medición se mide previa e individualmente.
4. Procedimiento según la reivindicación 2, para el cual se mide la temperatura de la estructura y se compensa una variación en el tiempo de vuelo inducida por un cambio de temperatura.
- 20 5. Procedimiento según la reivindicación 2, que comprende una primera medición realizada en un estado inicial o de referencia de la estructura y que comprende una imagenología de la estructura realizada mediante tomografía a partir de dicha primera medición que permite identificar ciertas particularidades geométricas de la estructura.
6. Procedimiento según la reivindicación 5, que comprende además una segunda medición realizada en un estado posterior para los mismos pares de puntos de medición que la primera medición y que comprende además un mapeo por tomografía de las variaciones de velocidad de propagación en la estructura entre el estado inicial y el estado posterior obtenido a partir de las diferencias en los tiempos de vuelo medidos entre los dos estados.
- 25 7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para el cual un punto de medición comprende un sensor de tipo malla reticular de Bragg.
8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para el cual un punto de medición comprende tres sensores de tipo malla reticular de Bragg, receptores y direccionales, dispuestos sustancialmente a 120° entre sí en una configuración de roseta.
- 30 9. Procedimiento según la reivindicación 1, comprendiendo la medición por correlación una correlación de coda de correlaciones entre sensores de tipo malla reticular de Bragg.
10. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores que consta de una pluralidad de fibras ópticas según la reivindicación 1, pudiendo cada sensor de tipo malla reticular de Bragg ser interrogado por separado.
- 35 11. Sistema para el análisis de una estructura por correlación de campo acústico-elástico difuso, que comprende:
- al menos una fibra óptica que consta de una pluralidad de puntos de medición, constando un punto de medición de uno o más sensores de tipo malla reticular de Bragg, estando dichos sensores de tipo malla reticular de Bragg configurados para medir a lo largo del tiempo ondas acústico-elásticas a nivel de los puntos de medición;
  - una fuente de luz acoplada a la fibra óptica;
  - 40 - un fotodetector o un analizador de espectro óptico para analizar la luz reflejada después de su recorrido en la fibra óptica;
  - medios de procesamiento de la señal para realizar cálculos de correlación del campo acústico-elástico y de tomografía, estando los medios de procesamiento de la señal configurados para determinar por correlación de las señales acústico-elásticas para al menos una parte de los pares de sensores de tipo malla reticular de Bragg, una
  - 45 función de Green de la estructura.
12. Sistema según la reivindicación anterior, para el cual la fuente de luz es un láser cuya longitud de onda se hace variar o una fuente óptica de banda ancha cuyo espectro óptico reflejado está determinado.
13. Sistema que comprende una pluralidad de fibras ópticas según una cualquiera de las dos reivindicaciones anteriores, estando las fibras ópticas multiplexadas por medio de al menos un circulador óptico y/o un analizador de espectro y/o un multiplexor.
- 50 14. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, para el cual uno o más sensores unidireccionales de tipo malla reticular de Bragg se complementan mediante uno o más sensores omnidireccionales.

15. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, que comprende además una o más fuentes de ruido activas situadas en o sobre la estructura para obtener un campo acústico-elástico difuso.

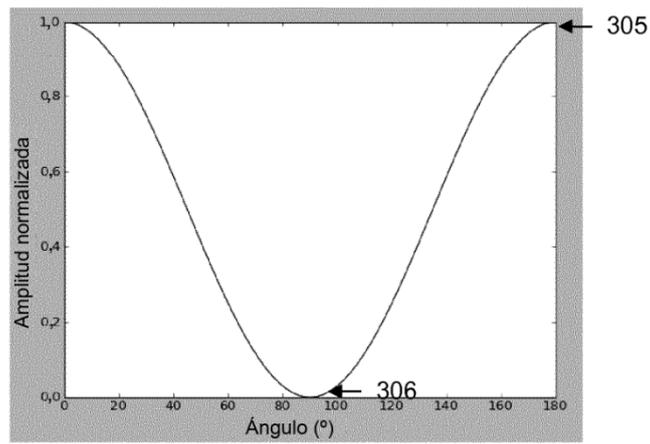
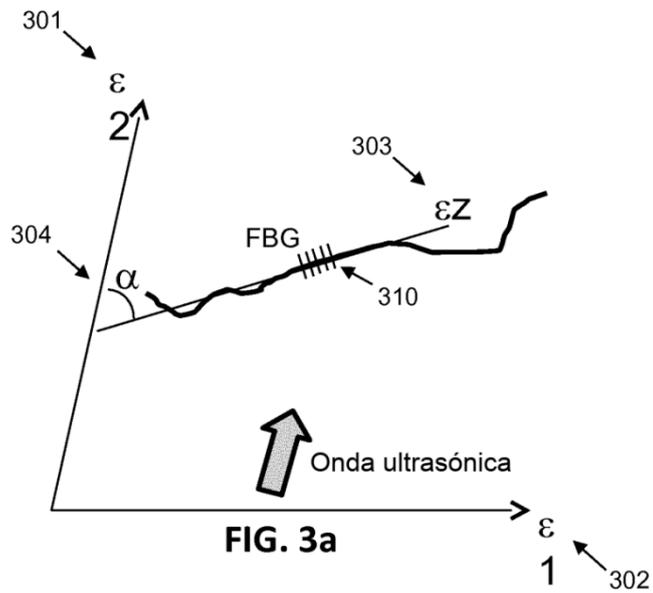
16. Sistema según la reivindicación anterior, siendo al menos una fuente de ruido activa un transductor piezoeléctrico.

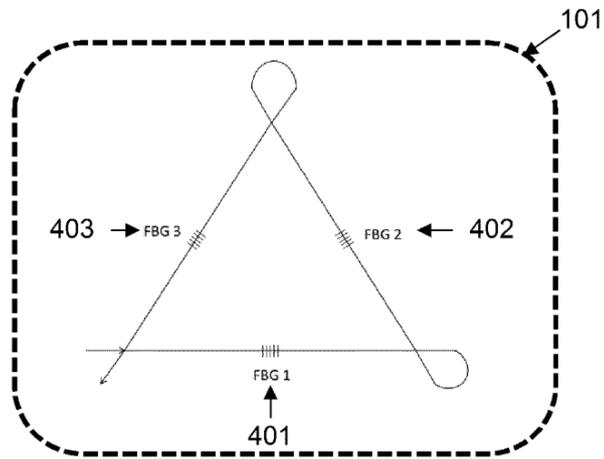


**FIG. 1**

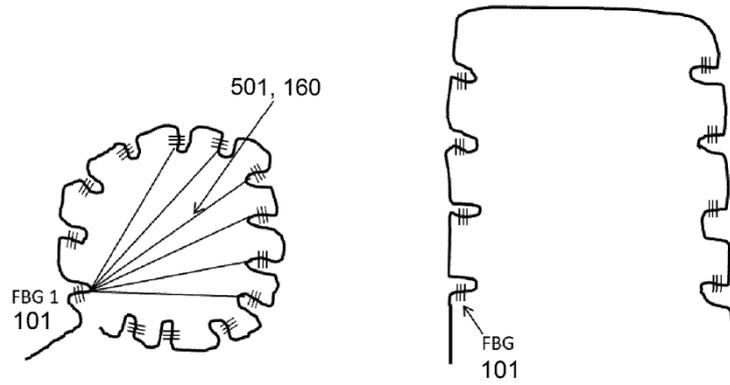


**FIG. 2**

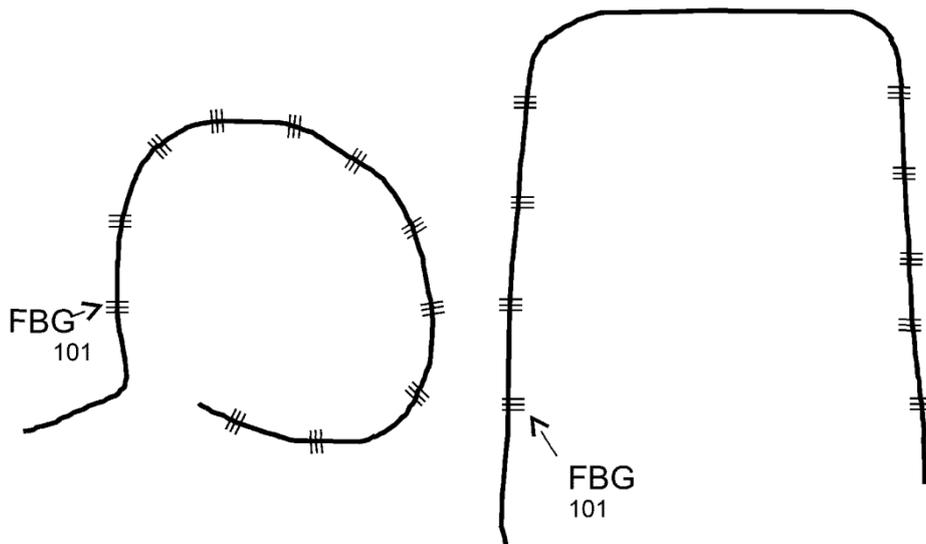




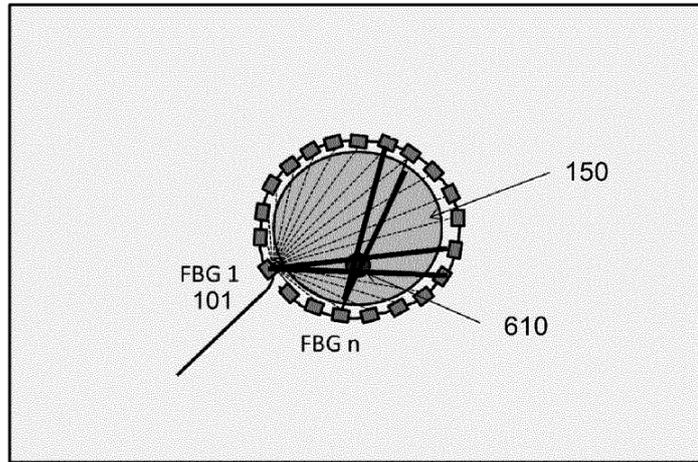
**FIG. 4**



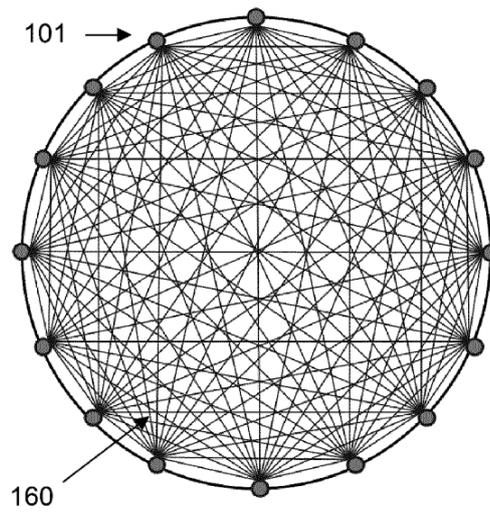
**FIG.5a**



**FIG.5b**



**FIG. 6**



**FIG. 7**