

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 622 092**

51 Int. Cl.:

**G01H 9/00** (2006.01)

**G01N 29/24** (2006.01)

**G01D 5/353** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.12.2014 E 14195846 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.02.2017 EP 2913638**

54 Título: **Aparato de detección de vibración y procedimiento de detección de vibración**

30 Prioridad:

**28.02.2014 JP 2014039087**

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

**05.07.2017**

73 Titular/es:

**FUJI JUKOGYO KABUSHIKI KAISHA (50.0%)**

**1-20-8, Ebisu Shibuya-ku**

**Tokyo 150-8554, JP y**

**THE UNIVERSITY OF TOKYO (50.0%)**

72 Inventor/es:

**SOEJIMA, HIDEKI;**

**OKABE, YOJI y**

**WU, QI**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 622 092 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**

Aparato de detección de vibración y procedimiento de detección de vibración

La implementación de la presente invención se refiere a un aparato de detección de vibración y un procedimiento de detección de vibración. Se conoce una técnica para detectar vibración, tal como vibración ultrasónica, que utiliza una red de Bragg en fibra (FBG) o una red de guía de ondas en matriz (AWG), (véase JP-2011-196744 A y JP-2007-232371 A).

HIROSHI TSUDA "Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser", OPTICS LETTERS, volumen 35, no. 14, 15 de julio de 2010, página 2349, XP055182332 describe un sistema de detección de vibración de red de Bragg en fibra (FBG) que emplea un láser de anillo de fibra que utiliza un sensor FBG como espejo de cavidad anular. El documento EP 2 549 247 A1 se refiere a un sistema para detectar la vibración de vibración de baja frecuencia a vibración ultrasónica por Red de Bragg en fibra usando un láser de fibra, y un aparato y un procedimiento de detección de vibración usando el sistema. El documento US 6 122 305 A describe un sistema para interrogar una o más redes de Bragg en fibra separadas de la fuente óptica por una fibra óptica dispersiva. El documento US 5 488 475 A está dirigido a una cavidad que usa una sección de fibra dopada activa para establecer múltiples modos de oscilación en la cavidad que crean frecuencias de golpes usadas para determinar la tensión de fibra y que incluye una sección de la fibra que es insensible a la tensión aparente creada térmicamente. D. GATTI ET AL "Fiber strain sensor based on a  $[\pi]$ -phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique", OPTICS EXPRESS, volumen 16, No. 3, 4 de febrero de 2008, página 1945, El documento XP 055182537 describe un sensor de tensión de fibra basado en una red de Bragg desplazada en fase- $[\pi]$  y un láser de diodo de cavidad extendida. El documento EP 2 259 037 A2 se refiere a sensores ópticos que utilizan redes de Bragg en fibra y luz lenta.

Asrul Izam Azami et al "Performance Enhancement of Vibration Sensing Employing Multiple Phase-Shifted Fiber Bragg Grating", Journal of Lightwave Technology, Volumen 29, No. 22, 15 de noviembre de 2011, páginas 3453-3460, XP011391692, describe un dispositivo de detección de vibraciones que utiliza 17 redes de Bragg en fibras desplazadas en fase.

Un objeto de la presente invención es proporcionar un aparato de detección de vibración y un procedimiento de detección de vibración que permitan detectar una vibración, un ultrasonido, una emisión acústica (AE) o similar, con una buena relación de señal – ruido (SNR).

Un aspecto de la presente invención proporciona un aparato de detección de vibración incluyendo un resonador de láser de anillo, una red de Bragg en fibra y un sistema de detección. El resonador de láser de anillo genera un rayo láser que propaga un trayecto de luz en forma de anillo. La red de Bragg en fibra está dispuesta en el resonador de láser de anillo de manera tal que el rayo láser ingresa a la red, y tiene una característica de distribución de transmitancia de luz transmitida en una dirección de longitud de onda, que cambia de acuerdo con la vibración de un objeto El sistema de detección detecta la vibración en base a la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra.

Otro aspecto de la presente invención proporciona un procedimiento de detección de vibración que incluye una etapa para genera un haz láser que propaga un trayecto de luz en forma de anillo, una etapa para permitir que el rayo láser entre en una red de Bragg en fibra cuya característica de distribución de transmitancia de luz transmitida en una dirección de longitud de onda cambia de acuerdo con la vibración de un objeto, y una etapa para detectar la vibración en base a la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra.

Se describirá un aparato de detección de vibración y un procedimiento de detección de vibración de acuerdo a una implementación de la presente invención con referencia a los dibujos adjuntos.

La FIG. 1 es un diagrama de bloques que representa un aparato de detección de vibración de acuerdo a una implementación de la presente invención;

La FIG. 2 es un diagrama que ilustra un ejemplo de un espectro de longitud de onda de luz transmitida a través de un PS-FBG usado como FBG en la FIG. 1, y un espectro de longitud de onda de luz reflejada de un AFBG utilizado como el filtro óptico en la FIG. 1;

La FIG. 3 es un diagrama que ilustra un resultado de simulación de un modo longitudinal principal  $L_m$ , que es extraído por la PS-FBG que tiene el espectro de transmisión ilustrado en la FIG. 2;

La FIG. 4 es un diagrama que representa una función de autoajuste para un rango de medición de rayo láser en PS-FBG;

Las Figs. 5A a 5C son diagramas que ilustran un ejemplo cuando se genera el autoajuste para el rango de medición en PS-FBG;

Las Figs. 6A a 6D son diagramas que ilustran una comparación entre una vibración ultrasónica detectada por el aparato de detección de vibración en la FIG. 1 y un resultado de detección por otro aparato de detección;

La FIG. 7 es un diagrama que ilustra la comparación entre la energía de una señal de detección que tiene diferentes frecuencias detectadas por el aparato de detección de vibración en la Fig. 1, y un resultado cuando se utiliza un sensor PZT; y

5 La FIG. 8 es un diagrama que ilustra la comparación entre la SNR de una señal de detección que tiene frecuencias diferentes detectadas por el aparato de detección de vibración en la Fig. 1, y un resultado cuando se utiliza un sensor PZT.

(Configuración y funciones)

La FIG. 1 es un diagrama de bloques del aparato de detección de vibración 1 de acuerdo con una implementación de la presente invención.

10 El aparato de detección de vibración 1 es un sistema que detecta la vibración generada en un objeto O constituido por un metal tal como aluminio o un material mixto como el plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP). Para activar esta función, el aparato de detección de vibración 1 incluye un sistema óptico 2 y un sistema de detección 3.

15 El sistema óptico 2 puede configurarse conectando un amplificador de fibra óptica 5, un FBG 6, un circulador óptico 7, un acoplador óptico (OC) 8 y un primer controlador de polarización (PC) 9 a una fibra óptica en forma de anillo 4. Un filtro óptico de tipo reflexión 10 está conectado a un borde de una fibra óptica, que se ramifica desde la fibra óptica en forma de anillo 4 a través del circulador óptico 7. En otras palabras, es preferible que el filtro óptico 10 esté conectado a la fibra óptica en forma de anillo 4 a través del circulador óptico 7. Si es necesario, una segunda PC 11 también está conectada entre el circulador óptico 7 y el filtro óptico 10.

20 Para la fibra óptica en forma de anillo 4, se puede utilizar, por ejemplo, una fibra óptica de modo simple que transmite luz en un modo único, por ejemplo. La fibra óptica en forma de anillo 4 funciona como el resonador de láser de anillo de la presente invención, que genera un rayo láser amplificado que propaga un trayecto de luz en forma de anillo.

25 Si el rayo láser entra en la fibra óptica en forma de anillo 4 que funciona como un resonador de anillo, una pluralidad de modos longitudinales, de acuerdo con la frecuencia de resonancia del resonador de anillo, es generada de forma discontinua por los fenómenos de resonancia del rayo láser. El modo longitudinal es un modo de un campo electromagnético en la dirección del eje óptico (dirección de propagación de la luz), y corresponde a una pluralidad de espectros lineales en una dirección de longitud de onda, cuyo ancho de la mitad del valor es extremadamente estrecho. Particularmente en el resonador de láser de anillo, se generan muchos modos longitudinales.

30 Un ejemplo típico del amplificador de fibra óptica 5 es un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), como se ilustra en la FIG. 1. EDFA es el amplificador de fibra óptica 5 creado por la inyección de iones de erbio en el núcleo de una fibra óptica.

35 La FBG 6 está dispuesta sobre la fibra óptica en forma de anillo 4 que funciona como un resonador de láser de anillo, de modo que un rayo láser fuerte entra en la FBG 6. La FBG 6 está idealmente constituida por una FBG de desplazamiento de fase (PS-FBG). La PS-FBG es una FBG en la que se usa localmente un desplazamiento de fase para la fluctuación periódica del índice de refracción. Por ejemplo, la PS-FBG se puede crear conectando dos FBG de las cuales las fases para la fluctuación periódica del índice de refracción se desplazan entre sí 180°.

40 El espectro de la luz transmitida a través de la PS-FBG en el dominio de longitud de onda es un espectro del cual el ancho de banda es extremadamente estrecho y la pendiente es aguda. Por lo tanto, si se usa la PS-FBG como FBG 6, sólo puede transmitirse un modo longitudinal específico, de una pluralidad de modos longitudinales generados por la resonancia del rayo láser que propaga una fibra óptica en forma de anillo 4. En otras palabras, la PS-FBG funciona como un elemento de filtro óptico para extraer un modo longitudinal específico de una pluralidad de modos longitudinales.

45 La FBG 6 está unida al objeto O para vibrar a medida que el objeto O vibra. Por ejemplo, la FBG 6 puede ponerse en contacto con el objeto O usando un acoplador ultrasónico que tiene una alta impedancia acústica. Entonces si el objeto O se hace vibrar mediante una onda ultrasónica o AE, la vibración se propaga a la FBG 6.

50 Cuando se aplica la vibración al objeto O y el objeto O se desplaza por deformación, la FBG 6, a la que se propaga la vibración, se estira junto con el objeto O. Si la FBG 6 se estira, la longitud de onda de Bragg de la FBG 6 cambia. Como resultado, el espectro de longitud de onda de la luz transmitida a través de la FBG 6 cambia en la dirección de longitud de onda de acuerdo con la cantidad de estiramiento de la FBG 6. En otras palabras, el espectro de longitud de onda de la luz transmitida a través de la FBG 6 cambia en la dirección de la longitud de onda en una cantidad de desplazamiento de acuerdo con la amplitud de la vibración del objeto O. Esto significa que la característica de distribución de transmitancia de la luz transmitida a través de la FBG 6 en la dirección de la longitud de onda cambia de acuerdo con la vibración del objeto O.

55 Por lo tanto, la intensidad del modo longitudinal que se transmite a través de la FBG 6 cambia en la cantidad de acuerdo con la intensidad de la vibración del objeto O. Esto significa que la vibración del objeto O puede detectarse

observando el cambio temporal de la intensidad del modo longitudinal transmitida a través de la FBG 6. Por lo tanto, es preferible que la FBG 6, constituida por la PS-FBG, tenga una función de sensor óptico para detectar la vibración del objeto O, además de la función como un elemento de filtro óptico que selecciona un modo longitudinal específico a partir de una pluralidad de modos longitudinales generados por la resonancia del rayo láser. Por lo tanto, en el caso de aplicar la vibración ultrasónica al objeto O, la FBG 6 puede utilizarse como un sensor de recepción ultrasónico.

La luz incidente a la FBG 6 es generada por el amplificador de fibra óptica 5. La luz transmitida a través de la FBG 6 propaga la fibra óptica en forma de anillo 4, y es amplificada por el amplificador de fibra óptica 5. Entonces la luz transmitida a través de la FBG 6, amplificada por el amplificador de fibra óptica 5, propaga de nuevo la fibra óptica en forma de anillo 4 y entra en la FBG 6. De esta manera, el amplificador de fibra óptica 5 desempeña un papel de amplificación de la luz transmitida a través de la FBG 6 que tiene un espectro de longitud de onda de acuerdo con la vibración del objeto O, generado por la luz que entra en la FBG 6, y permite que la luz transmitida entre de nuevo en la FBG 6.

El circulador óptico 7 es un elemento óptico que emite un rayo láser que entra desde la fibra óptica en forma de anillo 4 hacia el filtro óptico 10 y pasa el rayo láser reflejado en el filtro óptico 10 de nuevo a la fibra óptica en forma de anillo 4.

El OC 8 es un elemento óptico que ramifica una parte del rayo láser que entra desde la fibra óptica en forma de anillo 4. El rayo láser ramificado por el OC 8 se emite al sistema de detección 3 como luz de detección.

El primer PC 9 y el segundo PC 11 son elementos ópticos que controlan el estado de polarización del rayo láser respectivamente. En términos concretos, se controla el estado de polarización de manera que la directividad del rayo láser sea mejorada por el primer PC 9 y el segundo PC 11.

El filtro óptico 10 es un elemento óptico que quita los componentes en una banda de longitud de onda innecesaria de la luz transmitida que pasa a través de la FBG 6. El filtro óptico 10 puede estar constituido por una FBG apodizada de tipo reflexión (AFBG), según lo ilustrado. La AFBG es una FBG en la que se suprime el lóbulo lateral que aparece en el espectro de longitud de onda de luz transmitida o luz reflejada

Si se utiliza una AFBG para el filtro óptico 10, se puede obtener una señal óptica limpia. Esto permite usar la luz transmitida limpia a través de la FBG 6 como luz incidente para la próxima FBG 6.

La FIG. 2 es un diagrama que ilustra un ejemplo de un espectro de longitud de onda de luz transmitida que pasa a través de la PS-FBG usada como la FBG 6 en la FIG. 1, y un espectro de longitud de onda de luz reflejada desde la AFBG utilizada como filtro óptico 10 en la FIG. 1.

En la Fig. 2, la abscisa indica la longitud de onda de la luz, y la ordenada indica la intensidad de la luz. La línea discontinua en la FIG. 2 indica un espectro de transmisión de la PS-FBG, y la línea continua indica el espectro de reflexión de la AFBG. Como se ilustra en la FIG. 2, el espectro de transmisión de la PS-FBG tiene un pico que tiene una banda extremadamente estrecha. Si la longitud de onda de Bragg de la AFBG que tiene el espectro de reflexión de la banda que es más ancha que la PS-FBG se convierte en una longitud de onda de Bragg equivalente de la PS-FBG, entonces el pico del espectro de reflexión de la AFBG cubre el pico del espectro de transmisión de la PS-FBG, como se ilustra en la FIG. 2.

Por lo tanto, la luz transmitida de la PS-FBG en la banda de longitud de onda que corresponde a la longitud de onda central del espectro de transmisión de la PS-FBG se refleja en la AFBG. Por otro lado, los componentes innecesarios de longitudes de onda largas y los componentes de longitudes de onda cortas, que como se transmiten a través de la PS-FBG, están fuera de la banda de longitud de onda del espectro de reflexión de la AFBG. Por lo tanto, la AFBG puede eliminar los componentes innecesarios de longitud de onda de la luz transmitida a través de la PS-FBG. En otras palabras, el rayo láser que es transmitido a través de la PS-FBG y es reflejado por la AFBG es un rayo láser que tiene una longitud de onda en la banda de longitud de onda pico del espectro de transmisión de la PS-FBG. Mediante la combinación de la PS-FBG y la AFBG de esta manera, se puede crear un filtro óptico que tiene un ancho de banda extremadamente estrecho, y que se utiliza para detectar un rayo láser que tiene una longitud de onda específica

Por otra parte, una pluralidad de modos longitudinales (modos L) indicados por la línea discontinua en la FIG. 2 es generada en la dirección de la longitud de onda por la resonancia del rayo láser que se propaga a través de la fibra óptica en forma de anillo 4 que tiene una longitud de trayecto óptico larga. La pluralidad de modos longitudinales entra en la PS-FBG, pero el modo longitudinal que se transmite a través de la PS-FBG se convierte en el modo longitudinal que tiene una longitud de onda en la banda de longitud de onda pico del espectro de transmisión de la PS-FBG. Por lo tanto, un modo longitudinal principal  $L_m$ , que tiene una amplitud o longitud de onda específica, puede ser transmitido selectivamente ajustando apropiadamente la característica de transmisión de la PS-FBG.

La FIG. 3 es un diagrama que ilustra un resultado de simulación de un modo longitudinal principal  $L_m$ , que es extraído por la PS-FBG que tiene un espectro de transmisión ilustrado en la FIG. 2.

En la Fig. 3, la abscisa indica la longitud de onda de la luz, y la ordenada indica la intensidad relativa de la luz. Como se ilustra en la FIG. 3, muchos modos longitudinales que tienen diferentes longitudes de onda son generados por el resonador de láser de anillo. A partir de esto, un modo longitudinal principal  $L_m$ , que tiene una longitud de onda específica, puede ser transmitido selectivamente a través de la PS-FBG que tiene un espectro de transmisión agudo.

- 5 La longitud de onda de Bragg de la PS-FBG cambia dependiendo de factores ambientales, tales como un cambio de temperatura y un cambio en la tensión cuasi-estática. Por lo tanto, si la longitud de onda de Bragg de la PS-FBG está desplazada en gran parte por un cambio dramático de temperatura o similar, es probable que la longitud de onda del modo longitudinal principal  $L_m$ , seleccionado por la PS-FBG esté fuera de la banda del espectro de transmisión de la PS-FBG. En otras palabras, es probable que la longitud de onda del modo longitudinal principal  $L_m$  esté fuera del intervalo de medición. En la fibra óptica en forma de anillo 4, sin embargo, se genera una pluralidad de modos longitudinales, como se ilustra en la Fig. 2. Por lo tanto, el rango de medición puede ajustarse automáticamente en la dirección de longitud de onda del rayo láser utilizando la PS-FBG.

La FIG. 4 es un diagrama que representa una función de autoajuste para un rango de medición de rayo láser en la PS-FBG.

- 15 En la Fig. 4, la abscisa indica la longitud de onda, y la ordenada indica la intensidad relativa. Las líneas continuas de la FIG. 4 indican el espectro de transmisión de la PS-FBG y el modo longitudinal principal  $L_m$  que es transmitido a través de la PS-FBG correspondiente al espectro de transmisión. La línea discontinua indica la pérdida óptica.

- 20 Cuando se aplica vibración a la PS-FBG, el espectro de transmisión de la PS-FBG se desplaza ligeramente en la dirección de la longitud de onda. Sin embargo, si se produce un cambio importante en un factor ambiental, tal como la temperatura, el espectro de transmisión del PS-FBG se desplaza en gran medida a la dirección de la longitud de onda. Como resultado, el espectro de transmisión de la PS-FBG se convierte en el espectro indicado por la línea de puntos.

- 25 Entonces el modo longitudinal principal que se transmite a través de la PS-FBG se convierte en un modo longitudinal  $L_m'$ , que es adyacente al modo longitudinal principal  $L_m$  que ha sido transmitido a través de la PS-FBG antes del cambio causado por el cambio de un factor ambiental. En otras palabras, el rayo láser tiene una longitud de onda de la cual el modo longitudinal principal que se transmite a través de la PS-FBG es diferente. Esto significa que incluso si cambia un factor ambiental, tal como la temperatura, en el lugar donde está dispuesta la PS-FBG, la longitud de onda del modo longitudinal principal que es transmitida a través de la PS-FBG es auto-ajustada y el láser fuerte siempre se transmite a través de la PS-FBG.

- 30 Si la luz de detección se genera de esta manera mediante el método de selección de un modo longitudinal principal que tiene una longitud de onda específica de una pluralidad de modos longitudinales que tienen longitudes de onda diferentes utilizando la PS-FBG, puede crearse un sensor que puede rastrear un cambio ambiental, tal como cambio de temperatura.

- 35 Las Figs. 5A a 5C son diagramas que ilustran un ejemplo cuando se genera auto ajuste para el rango de medición en la PS-FBG.

En la Fig. 5A y la FIG. 5B, cada abscisa indica el tiempo, y cada ordenada indica la tensión relativa de una señal eléctrica de CC que corresponde a la intensidad del modo longitudinal principal que se transmite a través de la PS-FBG. En la Fig. 5C, la abscisa indica la frecuencia de la señal eléctrica en las Figs. 5A y 5B, y la ordenada indica la intensidad relativa de la señal eléctrica en las Figs. 5A y 5B.

- 40 La FIG. 5A ilustra un cambio en la tensión de la señal eléctrica que corresponde a la luz de transmisión a través de la PS-FBG cuando la temperatura cambia temporalmente. Como se ilustra en la FIG. 5A, la intensidad del modo longitudinal principal que se transmite a través de la PS-FBG cae de forma estable y gradualmente de una manera lineal aproximada de acuerdo con el cambio de temperatura. Esto es probablemente debido a que el espectro de transmisión de la PS-FBG cambia gradualmente en la dirección de la longitud de onda y la pérdida óptica aumenta de acuerdo con el cambio de temperatura.

Si la cantidad de cambio de temperatura excede el umbral, la intensidad del modo longitudinal principal que se transmite a través de la PS-FBG cambia repentinamente. Esto se debe a que el espectro de transmisión de la FBG se desplazó en gran medida en la dirección de la longitud de onda por el cambio de temperatura y el modo longitudinal principal como el objetivo de medición de la intensidad se desplazó al modo longitudinal adyacente.

- 50 La FIG. 5B es una vista ampliada de la porción discontinua de la señal eléctrica ilustrada en la FIG. 5A. Como se ilustra en la FIG. 5A y la FIG. 5B, la amplitud del modo longitudinal principal puede ser medida de forma estable por el autoajuste de la longitud de onda del modo longitudinal que se transmite a través de la PS-FBG, incluso si la temperatura cambia considerablemente. En otras palabras, la amplitud del modo longitudinal principal se puede medir de forma estable sin realizar control de realimentación para ajustar el estrecho rango dinámico de la PS-FBG.

- 55 La FIG. 5C ilustra el resultado de la transformada de Fourier rápida (FFT) de la parte de la FIG. 5A en el estado en que la señal eléctrica es estable. De acuerdo a la FIG. 5C, aparece un pico en la región de baja frecuencia debido a

la oscilación de relajación del rayo láser.

El modo longitudinal principal Lm, que ha sido transmitido a través de la PS-FBG y reflejado por la AFBG, puede amplificarse como se ha descrito anteriormente, mediante la resonancia del amplificador de fibra óptica 5 y el láser de anillo. El modo longitudinal principal amplificado Lm entra de nuevo en la PS-FBG. Como consecuencia, la amplitud del modo longitudinal principal Lm puede amplificarse a una amplitud predeterminada repitiendo la amplificación del modo longitudinal principal Lm una pluralidad de veces.

El sistema de detección 3 es un sistema que detecta la vibración del objeto O en base a la luz transmitida a través de la FBG 6, que ha sido amplificada por el amplificador de fibra óptica 5 al menos una vez, y cuya intensidad ha alcanzado una intensidad predeterminada. Por lo tanto, el sistema de detección 3 está conectado al lado de salida de la fibra óptica, que se ramifica desde la fibra óptica en forma de anillo 4 a través del OC 8.

Para detectar la vibración del objeto O, es preferible, en términos de mejorar la sensibilidad y la precisión, referirse a la amplitud del modo longitudinal principal Lm extraído por la PS-FBG, como en el ejemplo mencionado anteriormente. En otras palabras, se puede detectar la vibración del objeto O en base al cambio de la intensidad del modo longitudinal Lm que tiene la intensidad más alta que es transmitida a través de la PS-FBG, a partir de una pluralidad de modos longitudinales generados en la fibra óptica en forma de anillo 4. Si la característica de distribución de transmisión de la PS-FBG se desplaza en la dirección de la longitud de onda en una cantidad de desplazamiento que excede el umbral debido a un factor ambiental (por ejemplo, temperatura) distinto de la vibración del objeto O, se detecta la vibración del objeto O en base al cambio de la intensidad de otro modo longitudinal que corresponde a la cantidad de desplazamiento.

En este caso, la amplitud del modo longitudinal principal Lm se cambia en un cambio sutil en el espectro de transmitancia de la PS-FBG en la dirección de longitud de onda debido a la vibración del objeto O. Por lo tanto, el cambio temporal en la amplitud del modo longitudinal principal Lm corresponde a la forma de onda de la vibración del objeto O. Como resultado, se puede detectar la vibración del objeto O como el cambio temporal de la amplitud del modo longitudinal principal Lm. Además, se puede prever una tabla o funciones para indicar la relación entre la amplitud de la vibración del objeto O y la amplitud del modo longitudinal principal Lm, de manera que el cambio temporal de la amplitud del modo longitudinal principal Lm sea convertido en forma de onda de la vibración del objeto O.

Por ejemplo, el sistema de detección 3 puede ser configurado por un analizador de espectro óptico (OSA) 12, un fotodetector (PD) 13, un analizador eléctrico de espectro (ESA) 14, un osciloscopio 15 y un detector de defectos 16. En términos concretos, la línea de transmisión óptica puede configurarse de tal modo que la luz de detección emitida desde el OC8 al sistema de detección 3 se introduce en uno o ambos del OSA 12 y el PD 13. La luz de detección detectada por el PD 13 se convierte en una señal eléctrica que tiene una forma de onda de amplitud que corresponde a la forma de onda de amplitud de la luz de detección, y es emitida al ESA 14, el osciloscopio 15 y el detector de defectos 16 respectivamente.

El OSA 12 se utiliza para observar ópticamente el espectro de longitudes de onda de la luz de detección. En otras palabras, en la pantalla del OSA 12 se muestra un gráfico bidimensional cuya abscisa es la longitud de onda y la ordenada es la intensidad de la luz de detección. El ESA 14, por otra parte, se utiliza para observar el espectro de frecuencia de la señal eléctrica que corresponde a la luz de detección. En otras palabras, en la pantalla del ESA 14 se muestra un gráfico bidimensional cuya abscisa es la frecuencia y la ordenada es la intensidad de la señal eléctrica que corresponde a la luz de detección.

El osciloscopio 15 se utiliza para observar el cambio temporal de la intensidad de la señal eléctrica que corresponde a la luz de detección. En otras palabras, el gráfico bidimensional cuya abscisa es el tiempo y la ordenada es la intensidad de la señal eléctrica que corresponde a la luz de detección se muestra en la pantalla del osciloscopio 15. Aquí se puede observar el cambio temporal de la amplitud de la luz transmitida, como el modo longitudinal principal Lm, a través de la FBG 6.

El cambio temporal de la amplitud de la luz transmitida, tal como el modo longitudinal principal Lm, a través de la FBG 6, indica que el objeto O vibró como se ha mencionado anteriormente. Por lo tanto, en el osciloscopio 15, se puede detectar la vibración del objeto O, debido a tales ondas ultrasónicas como una onda de lampante ultrasónica o la vibración debido al AE generada en el objeto O.

El detector de defectos 16 puede detectar un defecto en el objeto O. El defecto del objeto O puede detectarse en base a la vibración detectada usando el osciloscopio 15 o por la forma de onda de amplitud de la luz de detección.

Por ejemplo, el patrón de forma de onda de la luz de detección cuando se aplica la vibración ultrasónica a un objeto O no defectuoso se puede almacenar de antemano. Entonces se puede detectar que el objeto O es defectuoso cuando un error cuadrático mínimo o una divergencia de funciones de correlación cruzada entre el patrón de forma de onda observado de la luz de detección y el patrón de forma de onda almacenado de la luz de detección excede un umbral predeterminado. En su lugar, se puede detectar que el objeto O es defectuoso cuando la vibración s detectada por AE.

Además de estos elementos de composición, el aparato de detección de vibración 1 puede incluir un sistema de transmisión de ondas ultrasónicas 17 y un sistema de recepción de ondas ultrasónicas 18 como elementos de composición adicionales. El sistema de transmisión de ondas ultrasónicas 17 es un sistema para aplicar la vibración ultrasónica al objeto O. El sistema de recepción de ondas ultrasónicas 18, por otra parte, es un sistema para recibir la vibración ultrasónica que se propaga a través del objeto O. El sistema de transmisión de ondas ultrasónicas 17 y el sistema de recepción de ondas ultrasónicas 18 pueden ser elementos piezoeléctricos constituidos por titanato de zirconato de plomo (PZT) o similares.

Si el sistema de transmisión de ondas ultrasónicas 17 está dispuesto en el aparato de detección de vibración 1, el aparato de detección de vibración 1 puede ser utilizado como un dispositivo de detección ultrasónico de fallas, que aplica vibración ultrasónica al objeto O y detecta si existe un defecto. Si el sistema de recepción de ondas ultrasónicas 18 está dispuesto en el aparato de detección de vibración 1, el sistema óptico 2 y el sistema de detección 3 pueden calibrarse comparando la forma de onda ultrasónica recibida por el sistema de recepción de ondas ultrasónicas 18 y la forma de onda ultrasónica detectada ópticamente como la forma de onda de amplitud de la luz de detección por el sistema de detección 3.

(Operación y función)

A continuación se describirá el funcionamiento y la función del aparato de detección de vibración 1.

Cuando se realiza la inspección de detección de fallos no destructivos utilizando el aparato de detección de vibración 1, se aplica una vibración ultrasónica al objeto O desde el sistema de transmisión de ondas ultrasónicas 17. Debido a esto, la vibración ultrasónica se propaga desde el objeto O hasta la FBG 6, tal como una PS-FBG, dispuesta en la fibra óptica en forma de anillo 4. Entonces la característica de distribución de transmisión de la luz transmitida a través de la FBG 6 en la dirección de longitud de onda cambia de acuerdo con la forma de onda de vibración del objeto O. Esto es también lo mismo cuando la vibración generada por el AE se propaga al objeto O.

Por otro lado, el rayo láser entra en la FBG 6 desde el amplificador de fibra óptica 5. De esta manera la luz transmitida de la FBG 6 que tiene un espectro de longitud de onda de acuerdo con la forma de onda de la vibración del objeto O, generada por la entrada de luz en la FBG 6, se emite desde la FBG 6. La luz transmitida emitida desde la FBG 6 entra en el filtro óptico 10, constituido por la AFBG o similar, a través del circulador óptico 7. Como resultado, la luz reflejada desde el filtro óptico 10, generada a partir de la luz transmitida a través de la FBG 6, entra en la fibra óptica en forma de anillo 4 a través del circulador óptico 7.

Por lo tanto, la luz transmitida a través de la FBG 6 después de que los componentes de ruido se eliminan entra en el amplificador de fibra óptica 5 y se amplifica. La luz transmitida a través de la FBG 6, que es amplificada por el amplificador de fibra óptica 5, vuelve a entrar a la FBG 6. A continuación, la eliminación de los componentes de ruido de la luz transmitida a través de la FBG 6 y la amplificación de la luz transmitida a través de la FBG 6 después de que los componentes de ruido son eliminados se repiten durante un número adecuado de veces. En concreto, se repite la amplificación de la luz transmitida a través de la FBG 6 hasta que la intensidad de la luz transmitida a través de la FBG 6 alcance una intensidad suficiente.

La luz transmitida a través de la FBG 6, cuya intensidad ha alcanzado una intensidad predeterminada por amplificación una o más veces, se envía al sistema de detección 3. Entonces se detecta la vibración del objeto O mediante el osciloscopio 15 del sistema de detección 3 en base a la luz transmitida a través de la FBG 6. En particular, cuando se utiliza la PS-FBG como FBG 6, se puede extraer el modo longitudinal principal como la luz transmitida a través de la PS-FBG. Esto significa que la vibración del objeto O puede ser detectada como un cambio temporal de la amplitud del modo longitudinal principal debido a un desplazamiento en el espectro de transmisión de la PS-FBG. En el OSA 12, se puede observar el espectro de transmisión de FBG 6.

El detector de defectos 16 determina si el objeto O es defectuoso en base al patrón de onda de la vibración detectado en el osciloscopio 15, o a la vibración de la luz transmitida a través de la FBG 6. Por ejemplo, se puede detectar un defecto en base a la diferencia entre la vibración ultrasónica aplicada al objeto O y la vibración ultrasónica detectada en el osciloscopio 15. Si se detecta una vibración con el osciloscopio 15 cuando la vibración ultrasónica no se aplica al objeto O, se determina que existe un defecto en el objeto O. De este modo, la inspección de detección de fallos puede realizarse para el objeto O.

En otras palabras, el mencionado aparato de detección de vibración 1 incluye la FBG 6, tal como la PS-FBG, como sensor óptico, y el filtro óptico 10, tal como la AFBG, en el resonador de láser de anillo, y la vibración del objeto O se mide observando la amplitud del modo longitudinal principal de la luz transmitida a través de la FBG 6 generada por el láser de anillo.

(Efectos)

Por lo tanto, de acuerdo a el aparato de detección de vibración 1, la vibración del objeto O puede detectarse con una buena SNR. Como resultado, promediar es innecesario, y el tiempo de medición y un número de tiempos de medición pueden disminuirse en comparación con las técnicas anteriores. Además, la vibración del objeto O puede detectarse con alta precisión. Estos efectos son particularmente llamativos cuando se utiliza la PS-FBG como FBG 6,

y cuando el filtro óptico 10, como AFBG, está dispuesto en el aparato de detección de vibración 1.

Como resultado, se puede detectar incluso una vibración cuyo nivel de energía es bajo, tal como una vibración debida a AE, generada cuando se genera un defecto dentro de un material compuesto utilizado como material para un avión.

- 5 Las Figs. 6A a 6D son diagramas que ilustran la comparación entre una vibración ultrasónica detectada por el aparato de detección de vibración 1 en la FIG. 1, y un resultado de detección por otro aparato de detección.

En las Figs. 6A, 6B, 6C y 6D, cada abscisa indica el tiempo, y la ordenada indica la tensión de una señal eléctrica. La FIG. 6A ilustra una forma de onda de tensión de una señal de entrada aplicada a un vibrador ultrasónico como una señal eléctrica de CA para aplicar la vibración ultrasónica al objeto. Como se ilustra en la FIG. 6A, una señal sinusoidal de 5 ciclos se convierte en una señal ultrasónica y se transmite al objeto.

10

La FIG. 6B ilustra una forma de onda de tensión de una señal de detección de vibración ultrasónica por un sistema de detección de vibración ultrasónica cuyo sensor es un PZT. La FIG. 6C ilustra una forma de onda de voltaje de una señal de detección de vibración ultrasónica que se adquirió promediando las señales de detección adquiridas 128 veces usando otro sistema de detección de vibración ultrasónica cuyo sensor es una PS-FBG que no está dispuesta sobre un láser de anillo de fibra (FRL). La línea de puntos en la FIG. 6C indica la forma de onda de tensión de la señal de detección de vibración ultrasónica cuando no se realiza el promedio.

15

La FIG. 6D ilustra una forma de onda de tensión de una señal de detección de vibración ultrasónica que se adquiere sin realizar el promedio por el aparato de detección de vibración 1, en el que la PS-FBG está dispuesta en el FRL.

20 De acuerdo a las FIGs. 6A a 6D, se confirma que la vibración ultrasónica se detecta aproximadamente a la misma hora de llegada independientemente de cuál de los siguientes sistemas se utilice: el sistema de detección de vibración ultrasónica cuyo sensor es un PZT; el sistema de detección de vibración ultrasónica cuyo sensor es PS-FBG; Y el aparato de detección de vibración 1 en el que la PS-FBG está dispuesta sobre el FRL.

También se confirma que la amplitud de la señal de detección de vibración ultrasónica detectada por el aparato de detección de vibración 1 es mayor que la amplitud de la señal de detección de vibración ultrasónica detectada por el sistema de detección de vibración ultrasónica, cuyo sensor es una PS-FBG o un PZT. Esto indica que la sensibilidad del aparato de detección de vibración 1 es mayor que la sensibilidad del sistema del cual el sensor es una PS-FBG o un PZT. En otras palabras, la sensibilidad de detección de la vibración puede mejorarse mediante el método de detección de luz transmitida que selecciona el modo longitudinal principal utilizando la PS-FBG que tiene un pico agudo en el espectro de transmisión y mide la amplitud.

25

30 La FIG. 7 es un diagrama que ilustra la comparación entre la energía de una señal de detección que tiene diferentes frecuencias detectadas por el aparato de detección de vibración 1 en la FIG. 1, y un resultado cuando se utiliza el sensor PZT.

En la FIG. 7, la abscisa indica la frecuencia de la señal de detección y la ordenada indica la energía de la señal de detección. En la FIG. 7, un punto negro indica la energía de la señal de detección del aparato de detección de vibración 1, un cuadrado negro indica la energía de la señal de detección del sistema que utiliza el sensor PZT, un círculo blanco indica la energía del ruido superpuesta en la señal de detección por el aparato de detección de vibración 1 y un cuadrado blanco indica la energía del ruido superpuesta en la señal de detección del sistema que utiliza el sensor PZT.

35

Como se ilustra en la FIG. 7, se confirma que cuando se detecta la vibración ultrasónica como la señal de detección utilizando el aparato de detección de vibración 1 en el que la PS-FBG está dispuesta sobre el FRL, la energía del componente de ruido es mayor que el caso en el que se utiliza el sistema basado en sensores PZT, pero la energía de la señal de detección es mayor cuando se utiliza el aparato de detección de vibración 1. Además, la energía de la señal de detección de vibración ultrasónica es mayor a cualquier frecuencia en comparación con el caso del sistema que utiliza el sensor PZT.

40

En particular, en el caso del sistema que utiliza el sensor PZT, la energía de la señal de detección desciende a ciertas frecuencias, pero en el caso del aparato de detección de vibración 1 en el que la PS-FBG está dispuesta en el FRL, la energía de la señal de detección no cae en ninguna frecuencia.

45

La FIG. 8 es un diagrama que ilustra la comparación entre la SNR de una señal de detección que tiene diferentes frecuencias detectadas por el aparato de detección de vibración 1 en la FIG. 1, y un resultado cuando se utiliza el sensor PZT.

50

En la FIG. 8, la abscisa indica la frecuencia de la señal de detección y la ordenada indica la SNR de la señal de detección. El círculo blanco en la FIG. 8 indica la SNR de la señal de detección del aparato de detección de vibración 1, el cuadrado blanco indica la SNR de la señal de detección del sistema que utiliza el sensor PZT y las dos líneas continuas indican las curvas adquiridas al suavizar los datos del diagrama de cada SNR respectivamente.

5 Como se ilustra en la FIG. 8, se confirma que la SNR de la señal de detección tiene una tendencia similar a la energía de la señal de detección. En otras palabras, en el caso del aparato de detección de vibración 1, la SNR de la señal de detección de vibración ultrasónica es más alta a cualquier frecuencia en comparación con el caso del sistema que utiliza el sensor PZT. Además, el cambio de frecuencia de la SNR es más suave cuando se utiliza el aparato de detección de vibración 1 en comparación con el caso del sistema que utiliza el sensor PZT.

De acuerdo a los resultados en la FIG. 7 y FIG. 8, se confirma que la característica de respuesta de frecuencia del aparato de detección de vibración 1 es mejor que el sistema que utiliza el sensor PZT.

10 Además de estos efectos, el aparato de detección de vibración 1 no necesita un componente tan costoso como un láser sintonizable. Por lo tanto, la vibración del objeto O puede ser detectada usando una configuración poco costosa.

15 Además, si se usa la PS-FBG como FBG 6, y se selecciona un modo longitudinal específico de una pluralidad de modos longitudinales, entonces se puede disminuir la influencia de cambios ambientales, tales como un cambio de temperatura. En otras palabras, el aparato de detección de vibración 1 se vuelve fuertemente resistente a las influencias ambientales. En términos concretos, el modo láser de la luz transmitida puede ajustarse automáticamente a un modo láser que tenga una longitud de onda apropiada.

Como resultado, se puede implementar simultáneamente una medición de vibración altamente sensible usando la PS-FBG que tiene un pico agudo en el espectro de transmisión y una banda ancha de rango de medición. Esto hace más fácil un ajuste que responda a los cambios ambientales, tal como un cambio de temperatura.

**REIVINDICACIONES**

1. Un aparato de detección de vibración (1), que comprende: un resonador de láser de anillo que genera un rayo láser que propaga un trayecto de luz en forma de anillo  
 5 una red de Bragg en fibra de cambio de fase (6) que está dispuesta en el resonador de láser de anillo de manera tal que el rayo láser ingresa a la red, y de la cual la característica de distribución de transmitancia de luz transmitida en una dirección de longitud de onda cambia de acuerdo con la vibración de un objeto (0); y  
 un sistema de detección (3) que detecta la vibración en base a un cambio de intensidad de la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6).
- 10 2. El aparato de detección de vibración de acuerdo a la reivindicación 1, en el que el sistema de detección (3) está configurado para detectar la vibración en base a un cambio de intensidad de un modo longitudinal que tiene la mayor intensidad de luz que es transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6), de múltiples modos longitudinales generados en el resonador de láser de anillo.
- 15 3. El aparato de detección de vibración de acuerdo a la reivindicación 2, en el que el sistema de detección (3) está configurado de manera tal que, cuando la característica de distribución de transmitancia es desplazada en la dirección de longitud de onda por una cantidad de desplazamiento que excede un umbral debido a un factor ambiental distinto de la vibración, la vibración se detecta en base a un cambio de intensidad de otro modo longitudinal correspondiente a la cantidad de desplazamiento.
- 20 4. El aparato de detección de vibración de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que además comprende un filtro óptico (10) que remueve componentes en una banda de frecuencia innecesaria de la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6) .
5. El aparato de detección de vibración de acuerdo a la reivindicación 4, en el que el filtro óptico (10) está conectado al resonador de láser de anillo a través de un circulador óptico (7).
- 25 6. El aparato de detección de vibración de acuerdo a la reivindicación 4 o la reivindicación 5 en el que el filtro óptico (10) está constituido por una red de Bragg en fibra apodizada.
- 30 7. El aparato de detección de vibración de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que además comprende un amplificador óptico que está dispuesto en el resonador de láser de anillo, y que amplifica la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6) y permite que la luz entre en la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6) otra vez, en el que el sistema de la detección (3) está configurado para detectar la vibración en base a la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6), cuya intensidad ha alcanzado una intensidad predeterminada amplificando la luz transmitida por el amplificador óptico al menos una vez.
- 35 8. El aparato de detección de vibración de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que además comprende un sistema de transmisión ultrasónica que aplica vibración por una onda de ultrasonido al objeto (0), en el que el sistema de detección (3) está configurado para detectar la vibración del objeto (0) generada por el sonido ultrasónico.
9. El aparato de detección de vibración de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el sistema de detección (3) está configurado para detectar la vibración debido a emisiones acústicas generadas en el objeto (0).
- 40 10. El aparato de detección de vibración de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que el sistema de detección (3) está configurado para detectar un defecto en el objeto (0) en base a la vibración detectada.
11. Un procedimiento de detección de vibración, que comprende las etapas de:  
 generar un rayo láser que propaga un trayecto de luz en forma de anillo  
 permitir que el rayo láser ingrese a una red de Bragg en fibra de cambio de fase (6) de la cual la distribución de transmitancia característica de luz transmitida en una dirección de longitud de onda cambia de acuerdo con la vibración de un objeto (0); y  
 45 detectar la vibración en base a un cambio de intensidad de la luz transmitida a través de la red de Bragg en fibra de cambio de fase (6).

FIG. 1

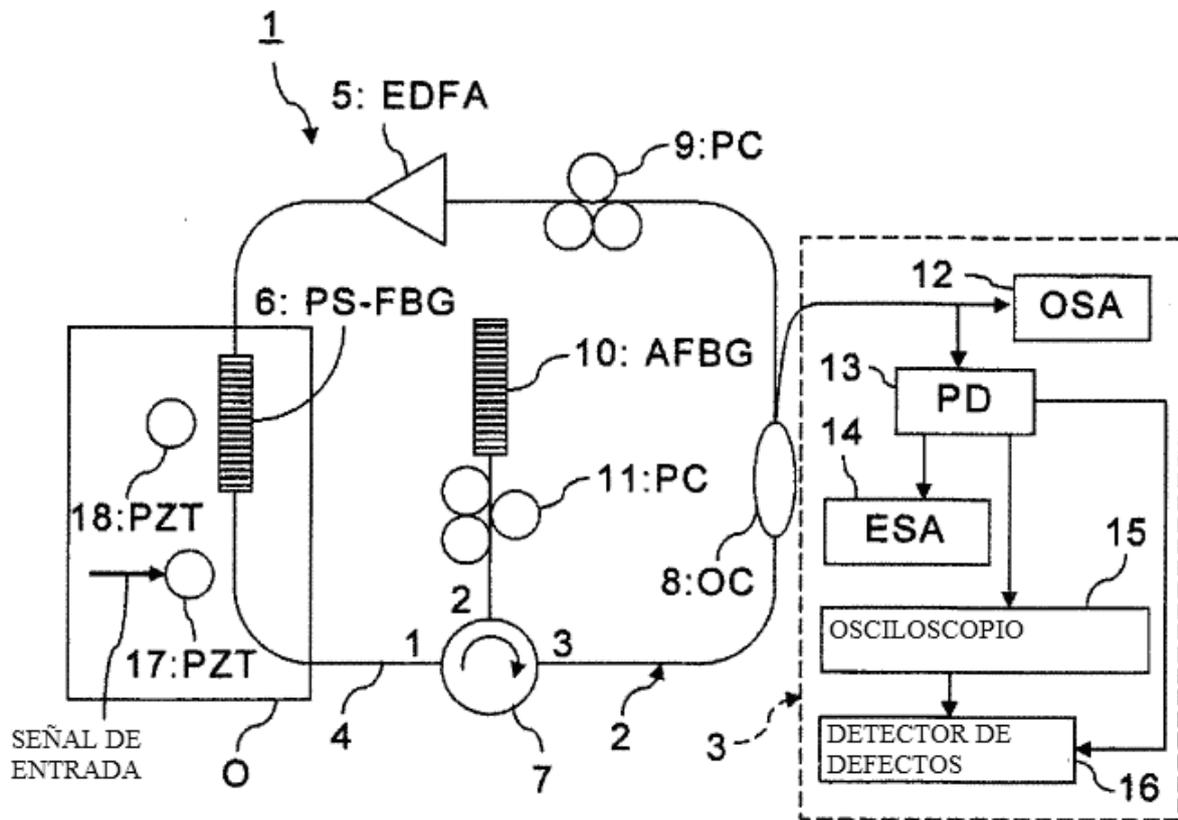


FIG. 2

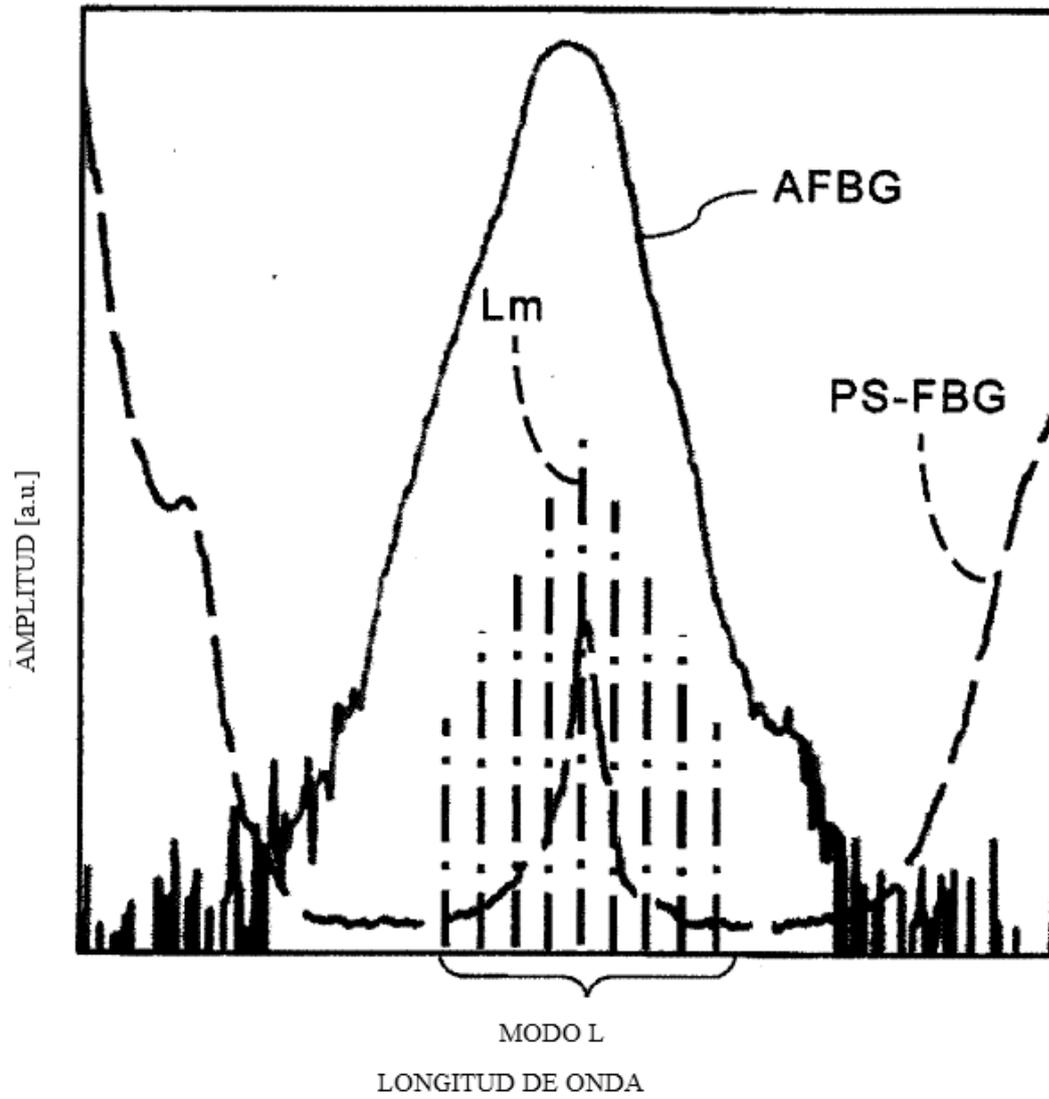


FIG. 3

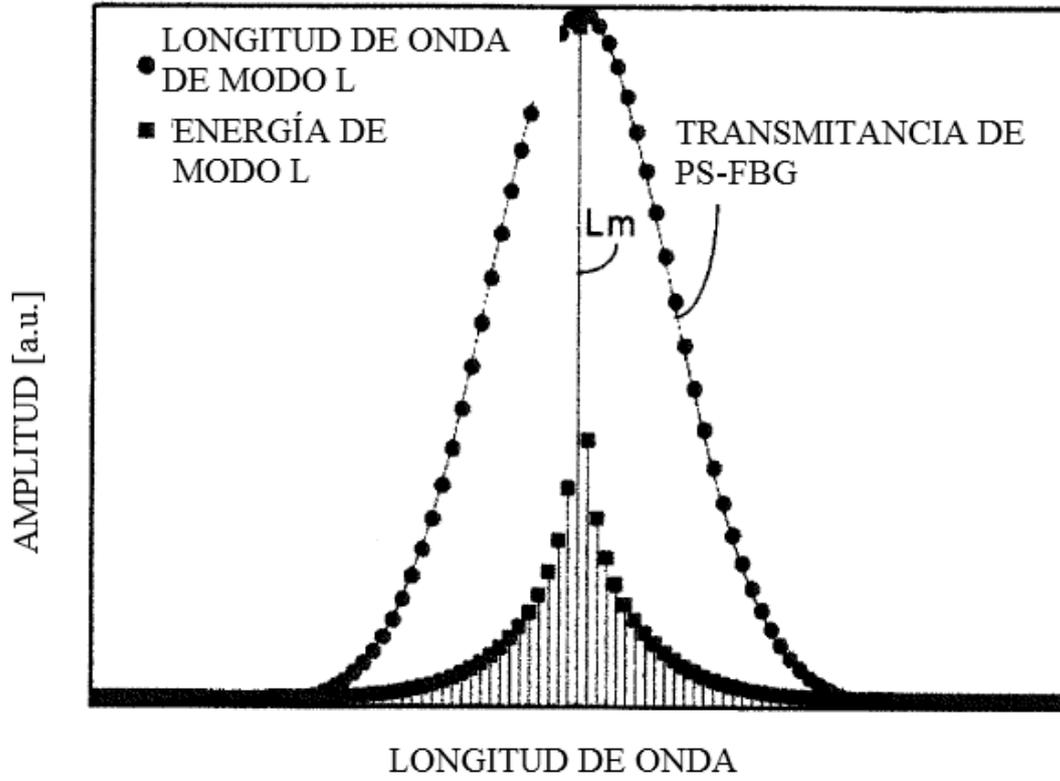


FIG. 4

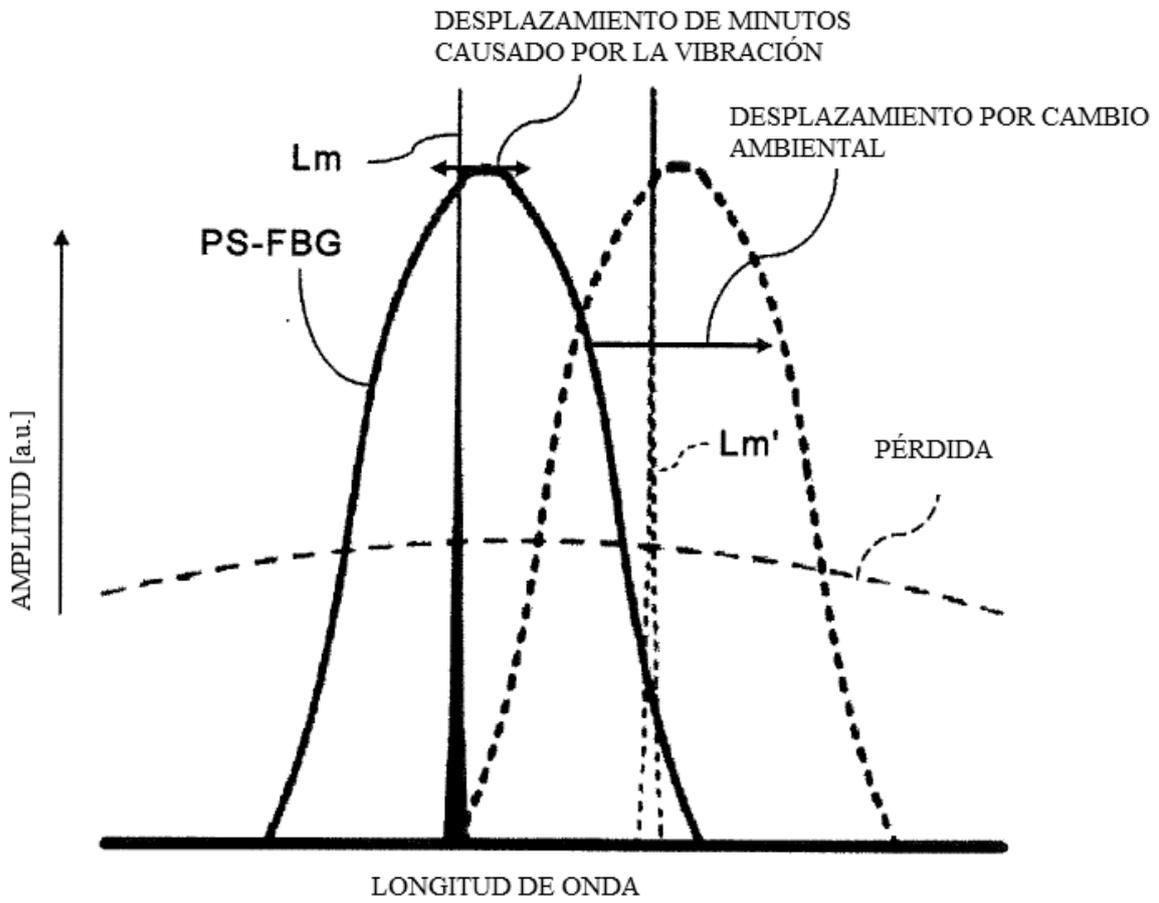


FIG. 5A

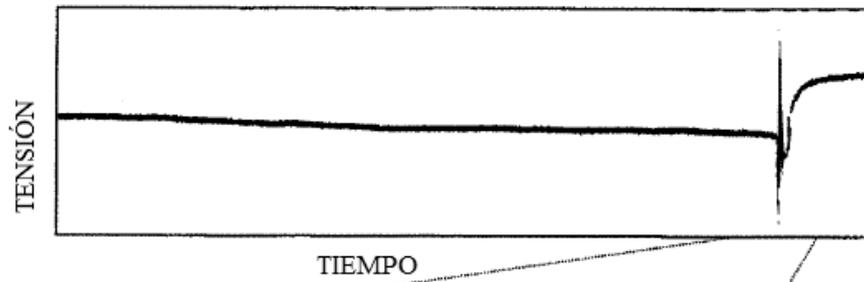


FIG. 5B

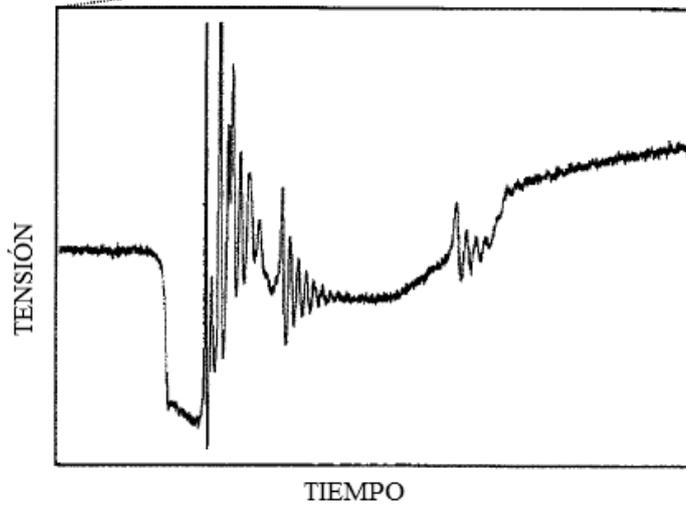
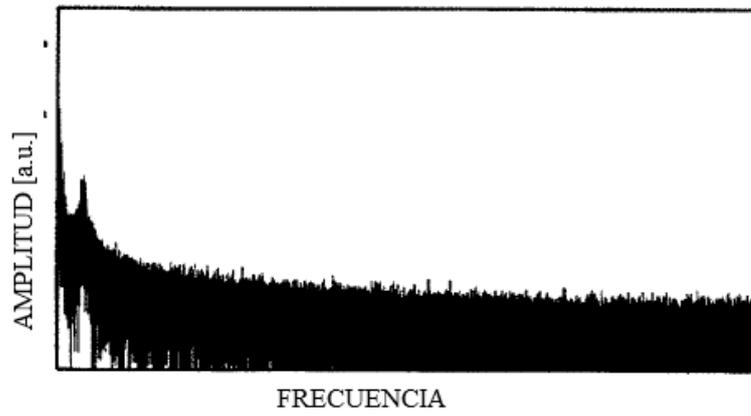


FIG. 5C



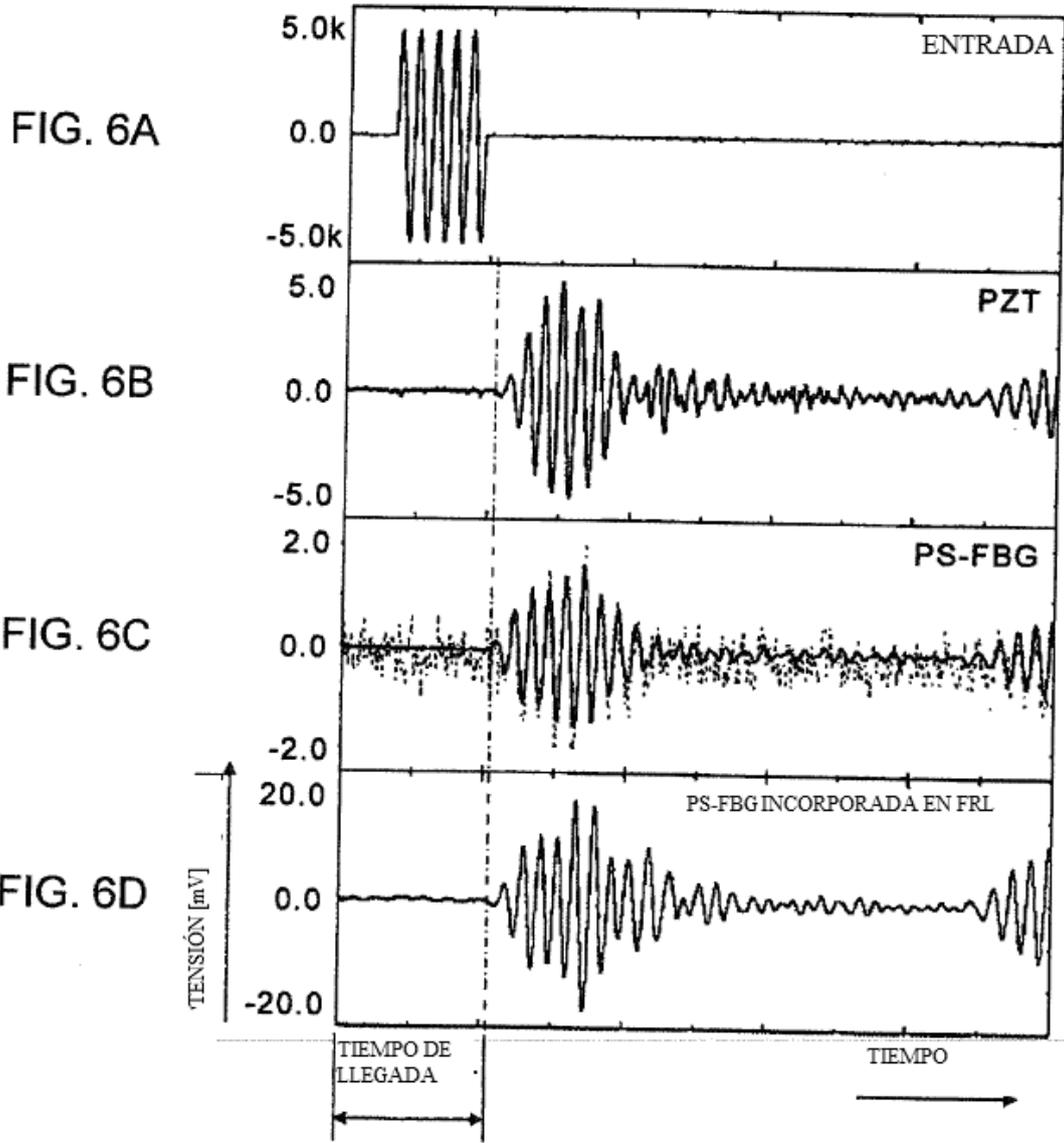


FIG. 7

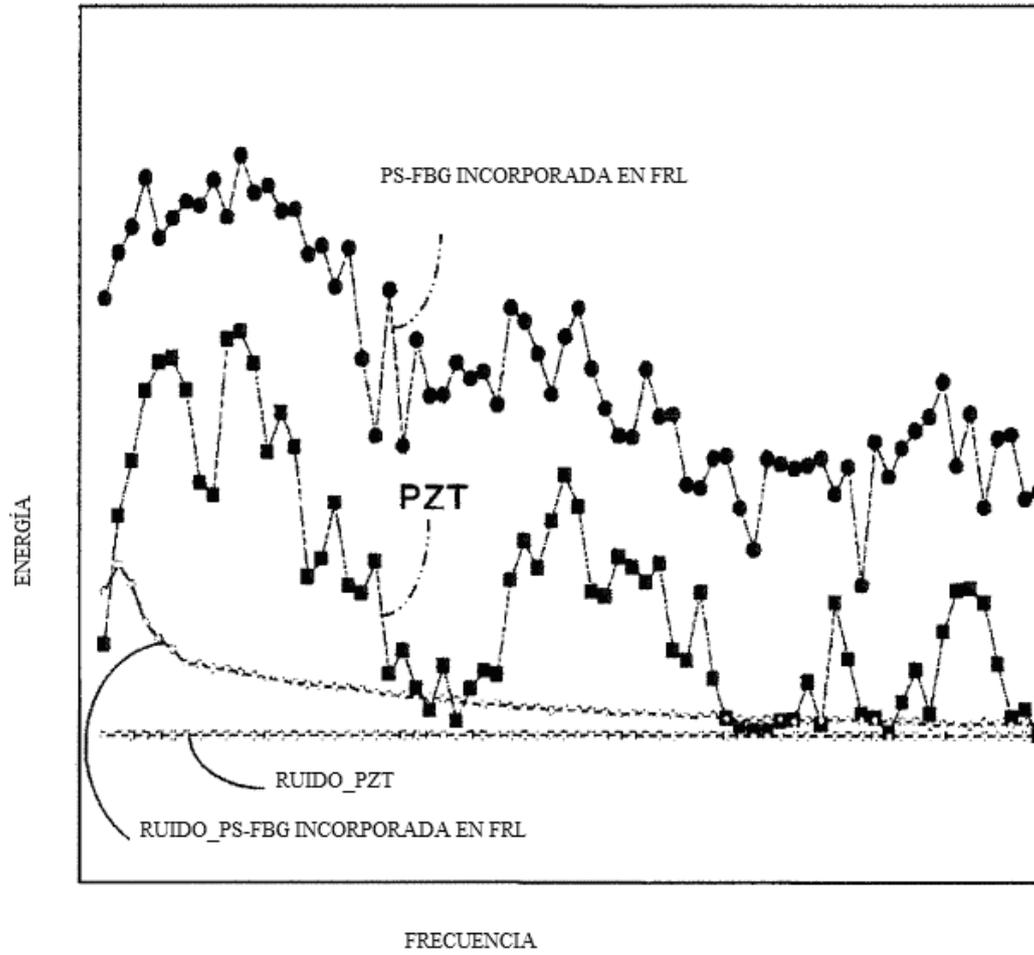


FIG. 8

