

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 958 920**

51 Int. Cl.:

**G01N 24/00** (2006.01)

**G01R 33/26** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.07.2020** **PCT/GB2020/051719**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.01.2021** **WO21009517**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.07.2020** **E 20756940 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.09.2023** **EP 3999839**

54 Título: **Sistema de magnetómetro atómico**

30 Prioridad:

**17.07.2019 GB 201910213**

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

**16.02.2024**

73 Titular/es:

**NPL MANAGEMENT LIMITED (50.0%)  
National Physical Laboratory Hampton Road  
Teddington, Middlesex TW11 0LW, GB y  
THE UNIVERSITY OF STRATHCLYDE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**CHALUPCZAK, WITOLD;  
GARTMAN, RAFAL y  
BEVINGTON, PATRICK**

74 Agente/Representante:

**SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio**

ES 2 958 920 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

Sistema de magnetómetro atómico

5 La invención se refiere a un sistema y método de magnetómetro atómico. La implementación de un magnetómetro atómico de radiofrecuencia (rf) como sensor de campo magnético crea nuevas oportunidades en las pruebas no destructivas basadas en tomografía de inducción magnética (MIT) [1-8] (los números entre corchetes se refieren a las referencias respectivas al final de esta descripción). El MIT se basa en la detección de la respuesta de una muestra a un campo magnético de rf oscilante, denominado primario. La respuesta del material, campo secundario, se produce por corrientes de Foucault en las muestras que son conductoras eléctricamente, y/o por magnetización en los casos que tienen una permeabilidad magnética. Además de una sensibilidad superior, un intervalo de sintonización más amplio [9] y una mejor resolución espacial [10] que las bobinas captadoras estándar, los magnetómetros atómicos permiten la cartografía semivectorial de todos los componentes del campo secundario. Con respecto a otros sensores de campo magnético, como los magnetómetros de magnetorresistencia gigante (GMR) [10-12] o los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID) [13, 14], los magnetómetros atómicos ofrecen la ventaja de operar en un entorno sin blindaje [9, 15, 16] sin criogenia y con pocas restricciones de miniaturización.

La obtención de imágenes tomográficas de un defecto en una muestra con un magnetómetro atómico de rf se basa en la observación de los cambios en la amplitud y la fase de la resonancia de rf a medida que la muestra se mueve bajo la bobina de campo primario de rf. Las muestras magnéticamente permeables presentan un desafío para el sensor atómico ya que la magnetización local de la muestra cambia la frecuencia de resonancia de rf. El problema se resuelve parcialmente mediante la estabilización activa del campo magnético en el que opera el sensor, aunque los cambios residuales de la frecuencia de resonancia experimentados dan lugar a una reducción de la velocidad de adquisición de imágenes [7].

25 Los aspectos de la presente invención buscan proporcionar un sistema y método de magnetómetro atómico mejorado.

De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un sistema de magnetómetro atómico, que incluye:

30 una fuente de campo magnético variable que se configura para proporcionar un campo magnético primario oscilante para hacer que una muestra produzca un campo magnético secundario; un magnetómetro atómico para detectar el campo magnético secundario; el magnetómetro atómico que incluye:

un espécimen atómico;  
 35 un subsistema de bomba y sonda que se configura para bombear el espécimen atómico a fin de crear una polarización y sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con un haz de sonda; un detector que se configura para detectar el haz de sonda para producir una señal de detección que tiene una frecuencia de oscilación;

40 el sistema se configura para accionar la fuente de campo magnético variable en dependencia de la señal de detección con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de oscilación de la señal de detección.

Las modalidades de la invención son capaces de proporcionar un sistema de magnetómetro atómico en el que el campo magnético secundario está siempre sintonizado a la resonancia de rf. Esto es capaz de evitar el lento escaneo de resonancia que es necesario en algunos sistemas de la técnica anterior. Se observa que el campo magnético primario también se sintoniza en resonancia de rf en modalidades de la invención. Sin embargo, es el campo magnético secundario lo que el magnetómetro atómico pretende detectar.

De acuerdo con la invención, la resonancia rf es la frecuencia de la precesión de coherencia atómica libre dentro del espécimen atómico.

En modalidades de la invención, los átomos del espécimen atómico junto con la sonda y la detección actúan como un generador de rf sintonizado a resonancia de rf. Mediante el uso de la señal resultante de la detección de la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico para accionar la fuente de campo magnético variable, el campo magnético secundario puede mantenerse automáticamente en resonancia.

Los sistemas de la técnica anterior suelen usar típicamente un generador de rf separado para generar una señal de rf para impulsar la fuente de campo magnético variable. Usar los átomos del espécimen atómico, junto con el subsistema de bomba y sonda y el detector, como generador de rf, también significa que las modalidades de la invención pueden evitar la necesidad de un generador de rf separado.

De acuerdo con la invención, el sistema se configura para controlar la variable fuente de campo magnético con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de oscilación de la señal de detección.

65 En algunas modalidades, la fuente de campo magnético variable se acopla a una salida del detector para que se controle en dependencia de la señal de detección.

- En algunas modalidades, la fuente de campo magnético variable se configura para colocarse adyacente a la muestra.
- En algunas modalidades, el sistema incluye un procesador de instrumentos que se configura para recibir la señal de detección y determinar de esta manera su amplitud y fase. El instrumento puede ser un procesador.
- 5 En algunas modalidades, el sistema incluye un seguidor de tensión que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal tamponada a partir de la señal de detección.
- 10 La fuente de campo magnético variable, particularmente en el caso de una bobina de baja impedancia, puede acoplarse a la salida del detector a través del seguidor de tensión para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal tamponada a partir de la señal de detección.
- 15 En algunas modalidades, el sistema incluye un amplificador que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal amplificada a partir de la señal de detección.
- 20 La fuente de campo magnético variable puede acoplarse a la salida del detector a través del amplificador para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal amplificada a partir de la señal de detección.
- En algunas modalidades, el sistema incluye un desfasador que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal desfasada a partir de la señal de detección.
- 25 La fuente de campo magnético variable puede acoplarse a la salida del detector a través del desfasador para accionar la fuente de campo magnético variable con una señal desfasada de la señal de detección.
- En algunas modalidades, el sistema incluye una fuente de campo magnético de polarización que se configura para proporcionar al espécimen atómico un campo magnético de polarización en una dirección de campo de polarización.
- El campo magnético de polarización puede definir un eje de cuantificación para el espécimen atómico.
- 30 En algunas modalidades, la fuente de campo magnético variable es una bobina de radiofrecuencia.
- En algunas modalidades, la fuente de campo magnético variable se acciona en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a la resonancia de rf teniendo una señal de tensión dependiente de la señal de detección acoplada a través de la bobina de rf.
- 35 La señal de tensión acoplada a través de la bobina de rf puede derivarse de la señal de detección siendo una amplificación y/o un desplazamiento de fase de la misma, pero preferentemente tiene una frecuencia correspondiente a la frecuencia de la señal de detección.
- 40 En algunas modalidades, la salida del detector se acopla a través de la bobina de radiofrecuencia, opcionalmente mediante un seguidor de tensión y/o el amplificador y/o el desfasador.
- En algunas modalidades, el espécimen atómico incluye una colección de átomos de metales alcalinos.
- 45 En algunas modalidades, el espécimen atómico incluye un vapor atómico de metal alcalino.
- En algunas modalidades, el sistema incluye un conjunto de fuentes de campo magnético variable que se configura para proporcionar el campo magnético primario oscilante, en donde que el sistema se configura para accionar cada una de las fuentes de campo magnético variable en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf y desfasada con respecto a la otra.
- 50 El hecho de que cada una de las fuentes de campo magnético variable sea accionada en fase desfasada con respecto a la otra permite que una de ellas sea accionada en fase con la señal de detección sin acondicionarse a través de un desfasador. Debido al cambio de fase, diferentes miembros del conjunto de fuentes de campo magnético variable pueden trabajar en diferentes partes de un defecto.
- 55 En algunas modalidades, el sistema incluye al menos un desfasador que se configura para activar al menos una del conjunto de fuentes de campo magnético variable con una señal desfasada de la señal de detección.
- 60 Cuando las señales que activan el conjunto de fuentes de campo magnético variable están desfasadas de la señal de detección, eso puede ser por un desfasador común o por sus propios desfasadores respectivos.
- El conjunto de fuentes de campo magnético variable puede condicionarse cada una con una señal amplificada a partir de la señal de detección de manera similar a como se describe para una fuente de campo magnético variable individual. Cuando las señales que accionan el conjunto de fuentes de campo magnético variable son amplificadas, pueden ser por un amplificador común o por sus propios amplificadores respectivos.
- 65

En algunas modalidades, el magnetómetro atómico se configura para reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección primaria sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

5 En algunas modalidades, la dirección primaria es una dirección desde la fuente de campo magnético variable hasta el espécimen atómico.

En algunas modalidades, la superficie de la muestra es la superficie investigada, típicamente una superficie principal de la muestra.

10 Algunas modalidades incluyen una fuente de campo magnético compensatorio, que puede incluir un arreglo de bobinas, para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico, en particular en el espécimen atómico del mismo, incluyendo un componente en la dirección primaria.

15 La fuente de campo magnético compensatorio se puede configurar para proporcionar el campo magnético compensatorio para reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en la dirección primaria.

En algunas modalidades, el magnetómetro atómico está en la configuración de autocompensación.

20 En algunas modalidades, el magnetómetro atómico tiene un eje insensible dispuesto en la dirección principal.

En algunas modalidades, el magnetómetro atómico incluye una fuente de campo magnético de polarización que se configura para proporcionar un campo magnético de polarización en la dirección primaria.

25 De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un método para operar un magnetómetro atómico para detectar un campo magnético secundario producido por una muestra, causado por un campo magnético primario oscilante proporcionado por una fuente de campo magnético variable, que incluye:

30 bombear un espécimen atómico para crear una polarización y sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con un haz de sonda;  
detectar el haz de sonda para producir una señal de detección;  
accionar dicha fuente de campo magnético variable con una frecuencia correspondiente a una frecuencia de la señal de detección.

35 En algunas modalidades, excitar la fuente de campo magnético variable incluye excitar la fuente de campo magnético variable con una señal amortiguada, y/o amplificada, y/o desfasada, a partir de la señal de detección.

En algunas modalidades, el método incluye posicionar el espécimen atómico en un campo magnético de polarización.

40 En algunas modalidades, el método incluye determinar una amplitud y fase de la señal de detección para detectar el campo magnético secundario.

45 El método puede incluir reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a una superficie de la muestra.

En algunas modalidades, la superficie de la muestra es la superficie investigada, típicamente una superficie principal de la muestra.

50 El campo magnético primario puede ser sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

55 En algunas modalidades, la reducción del efecto sobre un magnetómetro atómico de componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a una superficie de una muestra incluye: proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico, por ejemplo, en el espécimen atómico, que incluya un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

60 En algunas modalidades, el campo magnético compensatorio se proporciona de manera que  $Bz' + bz = 0$ , en donde  $Bz'$  es un componente de  $\vec{B}'$  que es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra,  $bz$  es un componente del campo magnético secundario que es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra,  $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$ ,  $\vec{B}$  es el campo magnético primario y  $\vec{B}_c$  es el campo magnético compensatorio.

65 En algunas modalidades, reducir el efecto sobre un magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de una muestra incluye: alinear un eje insensible del magnetómetro atómico con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

En algunas modalidades, el método incluye alinear un campo magnético polarizado con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

5 Los magnetómetros atómicos de radiofrecuencia ofrecen una alternativa atractiva a los métodos de detección estándar en las pruebas no destructivas que se basan en mediciones inductivas. Las modalidades proporcionan un magnetómetro en la denominada configuración de máser de espín, que aborda dos desafíos importantes de la técnica: cambios en la posición de resonancia de radiofrecuencia causados por muestras magnéticamente permeables y el ancho de banda del sensor.

10 Las modalidades proporcionan un máser de espín para pruebas y detección no destructivas.

Las modalidades de la invención son descritas más abajo, a manera de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos acompañantes.

15 La Figura 1 muestra un máser de espín estándar de metal alcalino equivalente al discutido en [23].

La Figura 2 es un diagrama de un sistema de acuerdo con una modalidad de la invención.

20 La Figura 3 es un diagrama esquemático del sistema de la Figura 2.

La Figura 4 muestra la incertidumbre estadística (desviación de Allan) de la amplitud de la señal de un magnetómetro en la configuración estándar (círculos rojos) y en el modo máser de espín (diamantes negros).

25 La Figura 5 muestra el transitorio en la señal magnetométrica auto oscilante.

30 La Figura 6 muestra el cambio medido de la amplitud de la señal de espectroscopia de rf en un área de 64 x 64 mm<sup>2</sup> de una placa de acero al carbono de 6 mm de espesor, que contiene una cavidad de 24 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad, registrado en cuatro configuraciones de medición: (a) configuración de autocompensación como en [8], configuración de autocompensación en el modo máser de espín con (b) una sola bobina de rf, (c) una sola bobina de rf con una fase opuesta a (b), y (c) dos bobinas de rf con fases opuestas.

La Figura 7 muestra la dependencia de la amplitud de la señal en función de la fase del accionamiento.

35 Las pruebas no destructivas convencionales y la detección de objetos ferromagnéticos con tomografía inductiva magnética con magnetómetros atómicos sufren cambios de resonancia de rf inducidos por los objetos probados. El funcionamiento del máser de espín, tal como se describe en la presente descripción, puede resolver ese problema y permitir una reducción significativa del tiempo de adquisición de imágenes.

40 Las modalidades proporcionan un modo de funcionamiento del magnetómetro atómico de radiofrecuencia, denominado máser de espín. Este modo se basa en el control óptico de las fluctuaciones espontáneas del espín atómico y en la señal de detección óptica que se devuelve al espécimen atómico. La frecuencia de operación del máser de espín sigue automáticamente el valor actual del campo de polarización. Los bucles de retroalimentación pueden incluir un búfer, amplificación y cambio de fase. Los beneficios incluyen una reducción significativa del tiempo de adquisición de la imagen, el contraste de la imagen y la operación sigilosa en caso de vigilancia.

45 Modalidades de la invención pueden encontrar aplicación para la detección de corrosión bajo aislamiento para el sector energético, monitoreo de estructuras de hormigón armado para el sector del transporte, monitoreo de recipientes para desechos nucleares, detección de objetos, vigilancia.

50 Las modalidades proporcionan una implementación de un magnetómetro atómico de rf que opera en el modo máser de espín en un esquema de medición MIT. La retroalimentación positiva en el sistema máser de espín no sólo ofrece una solución al problema de la estabilización imperfecta del campo magnético, sino que también aumenta el ancho de banda del sensor, la velocidad de adquisición de imágenes y la relación señal-ruido. Se han realizado amplios estudios teóricos y experimentales de los sistemas máser de espín, también llamados máseres Zeeman, en el contexto de los sistemas de gases nobles [17-20]. Un sistema máser de espín típico incluye dos partes: un bulbo de bombeo, donde se genera la polarización del espín nuclear, y un bulbo máser rodeado por una bobina captadora, que detecta las oscilaciones de los espines en un campo magnético estático y proporciona retroalimentación positiva. La polarización de espín se consigue mediante bombeo óptico directo, por ejemplo, con una lámpara de descarga [17], o mediante bombeo de intercambio de espín, es decir, transferencia de polarización desde átomos de metales alcalinos bombeados directamente de forma óptica a átomos de gases nobles mediada por colisiones de intercambio de espín [21]. Los espines nucleares en precesión alrededor de un campo magnético estático inducen una corriente en la bobina que rodea el bulbo del máser y, en consecuencia, un campo magnético oscilante dentro del bulbo. Este campo magnético refleja la evolución del espín y proporciona una retroalimentación positiva. Por el contrario, a la configuración del máser de espín nuclear, un magnetómetro atómico de rf monitoriza ópticamente las fluctuaciones espontáneas en la muestra de espín polarizado [22-24]. Esto se debe a la pequeña resistencia del campo magnético oscilante producido por los espines en precesión en el vapor de metal alcalino de baja densidad ( $10^{10-13}$  cm<sup>-3</sup>)

comparado con el creado por los espines de los gases nobles (por encima de  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) [25]. La señal detectada se introduce en una bobina de rf situada en los alrededores del vapor atómico, Figura 1. Esta separación de monitoreo y retroalimentación permite la introducción de amplificación y un cambio de fase en el circuito de retroalimentación.

5 Las modalidades de la presente invención utilizan magnetómetros atómicos de rf y pueden usarse para la formación de imágenes de defectos materiales.

Más abajo se describe una modalidad detallada, que es una implementación del máser de espín de metal alcalino descrito anteriormente.

10 Como puede verse en la Figura 2, una modalidad de la invención incluye un sistema 10 que incluye un magnetómetro atómico de radiofrecuencia 12 y una fuente de campo magnético primario variable 14 que se configura para proporcionar un campo magnético primario oscilante a frecuencia de rf. Se puede hacer referencia al sistema como una configuración de imagen inductiva magnética tomográfica y puede proporcionar un máser de espín en la medición  
15 inductiva magnética. En esta modalidad, la fuente de campo magnético principal 14 es una bobina de rf; sin embargo, pueden usarse otras fuentes de campo magnético variable en otras modalidades. La bobina de rf se configura para proporcionar un campo magnético primario sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra. En esta modalidad, la superficie es la superficie bajo investigación, que es una superficie principal de la muestra.

20 En esta modalidad, el sistema se configura para ejecutarse en un entorno no blindado con la misma instrumentación descrita en [6-8].

En esta modalidad, la bobina rf 14 es una bobina de 1000 vueltas con alambre de cobre de 0,02 mm de diámetro, 10 mm de altura, 2 mm y 4 mm de diámetro interior y exterior.

25 La bobina rf 14 se configura para que pueda colocarse adyacente a una muestra 16, pero completamente en un lado de la misma y en una relación de no superposición con ella, y puede funcionar para generar un campo magnético primario oscilante para hacer que la muestra produzca un campo magnético secundario. El campo magnético secundario es indicativo de una respuesta material de la muestra.

30 Las muestras deben ser eléctricamente conductoras (aunque no necesariamente altamente conductoras de electricidad) y/o deben tener una permeabilidad magnética de manera que puedan magnetizarse.

El magnetómetro atómico se configura para detectar el campo magnético secundario.

35 Vale la pena señalar que los objetivos ferromagnéticos producen 2 tipos de campos secundarios:

- un campo magnético secundario en la misma dirección que el campo primario aplicado - la magnetización secundaria, y
- 40 • campo magnético inducido por corrientes de Foucault en la dirección opuesta al campo primario aplicado - el campo magnético inducido por corrientes de Foucault.

En esta descripción, la dirección z es la dirección ortogonal a la superficie de la muestra, y las direcciones x e y son direcciones mutuamente ortogonales que son paralelas a la superficie de la muestra.

45 En esta modalidad, el magnetómetro atómico 12 incluye una celda de detección 20, que en esta modalidad es de 1  $\text{cm}^3$  celda de vidrio recubierta de parafina a temperatura ambiente que contiene vapor atómico de cesio (para el cual la densidad atómica  $n_{\text{Cs}} = 3,3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ). El vapor atómico de cesio proporciona un espécimen atómico para el magnetómetro.

50 El magnetómetro incluye una fuente de campo magnético de polarización 24 (no representada en la Figura 2) que se configura para proporcionar un campo magnético de polarización 26 a la célula de detección 20 y, por consiguiente, al espécimen atómico en una dirección de campo magnético de polarización. Los términos "polarización" y "desplazamiento" se usan indistintamente en el contexto de este campo magnético.

55 En esta modalidad, el campo magnético desplazado se estabiliza activamente mediante tres pares de bobinas de Helmholtz cuadradas, ortogonales y anidadas [3, 6-8, 35]. Estos proporcionan la fuente de campo magnético de polarización.

60 El magnetómetro incluye un láser de bombeo (no representado en la Figura 2) que se configura para bombear los átomos del espécimen atómico en la célula de detección 20 con un haz láser de bombeo 28 polarizado circularmente que se propaga a lo largo de la dirección del campo desplazado. En esta modalidad, el láser de bombeo es un láser de diodo estabilizado en frecuencia a  $6^2S_{1/2} F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=2$  (línea D2, 852 nm).

65 El haz láser de bombeo 28 se configura para bombear el espécimen atómico con el fin de crear una polarización o un desequilibrio de población o una anisotropía a lo largo del campo magnético de polarización.

El magnetómetro atómico incluye un láser de sonda (no mostrado en la Figura 2) que se configura para sondear la célula de detección 20 a fin de sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con un haz láser de sonda 32 polarizado linealmente, ortogonal al campo magnético de polarización 26 y desfasado con respecto al haz de bombeo, que en esta modalidad se desplaza 800 MHz hacia el azul desde la transición  $6^2S_{1/2}, F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}, F'=5$ .

El láser de bomba y el láser de sonda forman un subsistema de bomba y sonda.

La evolución del espín atómico colectivo se mapea en el estado de polarización del haz de sonda polarizado linealmente.

En esta modalidad, el magnetómetro atómico 12 se configura para reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico 12 de los componentes del campo magnético primario y, opcionalmente, también del campo magnético secundario en la dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra, denominada una dirección principal o z. En esta modalidad, la dirección primaria es una dirección, a lo largo del eje de la bobina de rf, desde la bobina de rf hasta el espécimen atómico. En esta modalidad, esto se debe a que el magnetómetro atómico está en la configuración de autocompensación, en donde el magnetómetro atómico tiene un eje insensible dispuesto en la dirección primaria, en donde el eje de la bobina de rf y, por lo tanto, el eje del campo primario está en dirección primaria y paralela a la dirección del campo de polarización. Por lo tanto, la dirección del campo de polarización también está en la dirección primaria en esta modalidad. Para el campo magnético de polarización ( $\vec{B}_{bias}$ ) orientado a lo largo z, que es preferentemente también la dirección del campo magnético primario ( $\vec{B}$ ),  $B_z$  (que es el componente de  $\vec{B}$  a lo largo de z) estará ausente en la señal del magnetómetro atómico de rf. Los detalles de esto se describen en [8] y en PCT/GB2019/051953, publicado como WO2020/016557.

Es posible usar otras formas de reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y opcionalmente secundario en la dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra como se describe en [8] y en WO2020/016557. Por ejemplo, algunas modalidades incluyen una fuente de campo magnético compensatorio, que puede incluir un arreglo de bobinas, para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico, en particular en el espécimen atómico del mismo, incluyendo un componente en la dirección primaria. En tales modalidades, el campo magnético compensatorio se puede proporcionar de manera que  $B_z' + b_z = 0$ , en donde  $B_z'$  es un componente de  $\vec{B}'$  que está a lo largo de z y sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra,  $b_z$  es un componente del campo magnético secundario que está a lo largo de z y sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra,  $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$ ,  $\vec{B}$  es el campo magnético primario y  $\vec{B}_c$  es el campo magnético compensatorio. La Figura 8 es un ejemplo de un sistema que incluye una fuente de campo magnético compensatorio 41 para proporcionar un campo magnético compensatorio oscilante, también llamado campo magnético de compensación, en el magnetómetro atómico, específicamente en la celda de detección 20, que incluye un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra 16 reduciendo y preferentemente eliminando el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes del campo magnético de los campos primario y secundario en esa dirección. En particular, el campo magnético compensatorio compensa la contribución del campo primario al campo resultante monitoreado por la celda de vapor del magnetómetro atómico, sin cambiar la eficiencia de la excitación del campo secundario ( $\vec{b}$ ).

Como puede verse en la Figura 8, en esta modalidad la fuente de campo magnético compensatorio 41 es un arreglo de bobina de compensación que incluye una primera bobina de compensación 42 y una segunda bobina de compensación 44.

La primera bobina de compensación 42 tiene un eje sustancialmente alineado con z, una dirección ortogonal a la superficie de la muestra 16 para proporcionar un campo magnético en el magnetómetro atómico, específicamente en la celda de detección 20, que es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra 16. En esta modalidad, la celda de detección 20 se ubica entre la bobina de rf 14 y la primera bobina de compensación 42, aunque esto no es necesario en todas las modalidades.

La segunda bobina de compensación 44 tiene un eje sustancialmente alineado con y, una dirección paralela a la superficie de la muestra 16 y sustancialmente ortogonal a la dirección del campo de polarización para proporcionar un campo magnético en el magnetómetro atómico, específicamente en la celda de detección 20 que es sustancialmente paralelo a la superficie de la muestra 16 y sustancialmente ortogonal a la dirección del campo de polarización.

En esta modalidad, la celda de detección 20 se ubica entre el láser de sonda 30 y la segunda bobina de compensación 44, y la segunda bobina de compensación 44 se ubica entre la celda de detección 20 y el polarímetro balanceado 34, aunque esto no es necesario en todas las modalidades.

El arreglo de bobina compensatoria 41 se configura para proporcionar, en la celda de detección 20, un campo magnético compensatorio  $\vec{B}_c$ .

5 En otras palabras, un conjunto de dos bobinas de rf orientadas a lo largo de las direcciones z e y (Figura 8) crea un campo magnético oscilante,  $\vec{B}_c$ , que compensa el campo primario visto por el magnetómetro atómico. Las bobinas son impulsadas por la señal de detección de una manera similar a la descrita en la presente descripción para impulsar la bobina 14 de rf para generar  $\vec{B}$ . Esto mantiene una diferencia de fase constante entre los campos  $\vec{B}$  y  $\vec{B}_c$ .

En otras palabras, el campo primario es compensado en la celda de vapor por un conjunto de dos bobinas de rf orientadas a lo largo de la dirección z e y.

10 Sin embargo, por las razones que se explican más abajo, la componente del campo magnético secundario en la dirección z también se compensa opcionalmente.

15 Las amplitudes de los dos componentes de  $\vec{B}_c$  se pueden variar cambiando la distancia de las bobinas relevantes de la celda de vapor.

El campo magnético resultante monitoreado por el magnetómetro atómico de rf incluye componentes del campo primario, secundario y de compensación, en otras palabras  $\vec{b} + \vec{B} + \vec{B}_c = \vec{b} + \vec{B}'$ .

20 La configuración permite determinar la amplitud y la fase (orientación) del campo rf en el plano y z. La amplitud  $(R = \sqrt{(b_y + B'_y)^2 + (b_z + B'_z)^2})$  y la fase  $(\varphi = \arctan(\frac{b_y + B'_y}{b_z + B'_z}))$  de la señal de espectroscopia rf describe los cambios en el campo resultante, donde  $b_z + B'_z$  y  $b_y + B'_y$  son las dos componentes en cuadratura de la señal rf.

25 Como se explica en el documento WO2020/016557 y [8], la condición para lograr el máximo contraste, con respecto a la  $\hat{z}$  componentes del eje, es cuando  $B'_z + b_{z,m\acute{a}x} = 0$ .

30 Aunque en la modalidad de la Figura 8,  $\vec{B}_c$  tiene componentes en dirección y así como también z, esto no es necesario en todas las modalidades. Por ejemplo, es posible compensar sólo en la dirección z. En la modalidad de la Figura 8, esto significa que se puede omitir la segunda bobina de compensación 44.

35 No es necesario en todas las modalidades reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico 12 de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en la dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

40 Volviendo a la modalidad de la Figura 2, el magnetómetro atómico incluye un detector. En esta modalidad, el detector incluye un polarímetro 34 que se configura para recibir el rayo láser de la sonda después de pasar por la celda de detección 20. El polarímetro 34 incluye un polarizador de cristal orientado a 45° con respecto a la polarización incidente y un fotodetector balanceado comercial.

La luz láser transmitida a través de la celda 20 es analizada por el polarímetro.

45 El detector se configura para emitir a través de una salida una señal de detección en respuesta a la detección del rayo láser de la sonda. Esta señal de detección es típicamente una señal de tensión o de corriente que representa la polarización y/o la amplitud del haz de sonda detectada. La salida del detector es en esta modalidad una salida del fotodetector balanceado que proporciona una señal de tensión que representa una polarización del haz de sonda.

50 En esta modalidad, el sistema 10 incluye un amplificador de bloqueo 36 (que se muestra en la Figura 3) que se configura para recibir la señal de detección del detector. El amplificador de bloqueo se configura para registrar o determinar una amplitud y fase de la señal de detección, también conocida como señal atómica, el amplificador de bloqueo se referencia a la frecuencia de la señal y para proporcionar una primera señal de salida, por ejemplo, a un computadora. La computadora puede usar la amplitud y la fase de la señal para detectar el campo magnético secundario y, de esta manera, una respuesta material de la muestra y, en algunos casos, para realizar imágenes de defectos materiales.

55 En algunas modalidades, la computadora puede incluir un receptor para recibir la primera señal de salida del amplificador de bloqueo 36 y determinar a partir de ella los cambios en la conductividad y/o la permeabilidad de la muestra.

60 La bobina rf 14 se conecta, a través de un amplificador 40 (mostrado en la Figura 3), a la salida del detector. El amplificador 40 se configura para recibir la señal de detección del detector y amplificarla para accionar la bobina de rf 14 en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf, siendo la resonancia de rf la frecuencia de la precesión de coherencia atómica libre dentro del espécimen atómico. En esta modalidad, el amplificador se configura para amplificar la señal de detección y aplicar esa señal amplificada como una tensión a través de la bobina de rf 14. El ajuste de frecuencia a la resonancia de rf se proporciona automáticamente porque el



espécimen atómico es la fuente de la señal y sirve, junto con el subsistema de bomba y sonda y el detector, como generador de rf.

5 En algunas modalidades, el sistema puede incluir un seguidor de tensión, además de un amplificador o en lugar de él, que se configura para impulsar la fuente de campo magnético variable con una señal amortiguada de la señal de detección. Esto es particularmente ventajoso cuando la bobina de rf es una bobina de baja impedancia.

10 No es necesario en todas las modalidades tener un amplificador o un seguidor de tensión. En algunas modalidades, la señal de detección se puede aplicar directamente a través de la bobina de rf.

15 En algunas modalidades, el sistema puede incluir un desfasador que se configura para desplazar la fase de la señal que impulsa la fuente de campo magnético primario, y por lo tanto para desplazar la fase de los campos magnéticos primario y secundario, con respecto a la señal de detección.

20 La Figura 2 muestra las fases del funcionamiento del másér de espín en la medición por tomografía de inducción magnética de acuerdo con esta modalidad. (1) La fluctuación espontánea de los átomos en el espécimen atómico crea pequeños procesos de espín atómico a la frecuencia de Larmor. (2) El haz de sonda monitorea la evolución del espín y la precesión del espín se asigna a la polarización del haz. (3) El fotodetector crea oscilaciones de tensión siguiendo los cambios de polarización. (4) La señal amplificada y posiblemente desfasada del fotodetector genera corriente en la bobina de campo de rf primaria. (5) El campo primario y/o secundario proporciona retroalimentación positiva a la precesión del espín atómico.

25 En funcionamiento, la fuente de campo magnético polarizado 24 proporciona un campo magnético polarizado en la celda de detección 20.

El láser de bombeo bombea el espécimen atómico para crear una polarización o un desequilibrio de población o una anisotropía a lo largo del campo magnético de polarización.

30 El láser de sonda se acciona para sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con el haz de sonda.

El haz de sonda se detecta por el detector y el detector emite una señal de detección.

35 La señal de detección se amplifica y la señal amplificada se aplica a través de la bobina de rf para accionar la bobina de rf 14 en dependencia de la señal de detección para proporcionar un campo magnético primario oscilante para causar que la muestra produzca el campo magnético secundario con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf. Como se mencionó en otra parte, en algunas modalidades es posible omitir la amplificación y/o incluir un cambio de fase.

40 Las modalidades pueden usarse para proporcionar las siguientes ventajas:

- Ser seguro y no invasivo (por ejemplo, radiaciones no ionizantes)
- Detecta la corrosión en la pared interna de una tubería.
- Detectar la corrosión en la pared exterior de una tubería.
- 45 • Ser capaz de diferenciar entre la corrosión y los cambios en las geometrías de las tuberías a partir de curvas/uniones en T/soldaduras en la tubería.
- Ser capaz de escanear a través de todos los tipos de aislamiento.
- Ser de bajo costo.
- 50 • Proporcionar mejoras a las técnicas actuales (resolución, cambiar modos de escaneo).

55 En algunas modalidades, el sistema puede incluir un conjunto de fuentes de campo magnético variable configuradas para proporcionar el campo magnético primario oscilante, en donde el sistema se configura para controlar cada fuente de campo magnético variable en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf y desfasados entre sí y con respecto a la señal de detección, aunque no se excluye que uno pueda estar en fase con la señal de detección. Cada una de las fuentes de campo magnético variable proporciona efectivamente un componente de cada uno de los campos magnéticos primario y secundario, y cada uno de esos componentes puede operar como se describió anteriormente (donde la referencia anterior es simplemente al campo magnético primario o secundario). El conjunto de fuentes de campo magnético variable puede ser un conjunto de bobinas de rf, cada una de las cuales se configura como se describió anteriormente. Al menos una del conjunto de fuentes de campo magnético variable se activa a través de un desfasador como se describe anteriormente para garantizar una diferencia de fase relativa entre el conjunto de fuentes de campo magnético variable. Cuando se vaya a utilizar un desfasador, un seguidor de tensión y/o un amplificador para más de una del conjunto de fuentes de campo magnético variable, un desfasador, un seguidor de tensión y/o un amplificador pueden ser comunes a una pluralidad, posiblemente a todos, de los un conjunto de fuentes de campo magnético variable y/o una pluralidad, posiblemente todo, del conjunto de fuentes de campo magnético variable puede usar sus propios desfasadores, seguidores de voltaje y/o amplificadores

respectivos.

El experto en la materia apreciará que el magnetómetro atómico particular descrito anteriormente no es el único tipo de magnetómetro atómico que se puede usar; por ejemplo, pueden usarse según sea apropiado celdas de detección diferentes, dimensiones diferentes, potencias diferentes, frecuencias de láser diferentes y transiciones diferentes. En particular, pueden usarse átomos distintos de los átomos de Cs en forma de estado sólido, líquido y/o vapor, y las frecuencias y potencias se pueden ajustar en consecuencia. Además, se pueden variar los medios de bombeo, generación de campo y detección de haz de sonda. Por ejemplo, el subsistema de bombeo y sondeo puede usar uno, dos, tres o más láseres para realizar el bombeo y el sondeo, y las polarizaciones de los haces pueden variar en algunas modalidades. El detector del haz de sonda también se puede variar, pero preferentemente es un fotodetector que puede detectar la polarización y/o la amplitud del haz de sonda.

En algunas modalidades, es posible usar el campo magnético de la Tierra como campo de polarización y, por lo tanto, omitir la fuente de campo magnético de polarización.

En algunas modalidades, el procesamiento puede aplicarse a la señal de detección antes de usarse para controlar la fuente de campo magnético variable. Sin embargo, en todas las modalidades, la señal que activa la fuente de campo magnético variable y, por lo tanto, la oscilación de los campos magnéticos primario y secundario debe depender de la señal de detección para tener la misma frecuencia de la misma.

Aunque en las modalidades anteriores se describe un amplificador de bloqueo 36 que graba o determina la amplitud y la fase de la señal atómica, puede usarse cualquier procesador siempre que pueda demodular la señal de detección con referencia a la frecuencia de la señal.

Aunque en las modalidades anteriores, la detección de respuesta del material se usa para la formación de imágenes de defectos de materiales, esto no es necesario en todas las modalidades. En algunas modalidades, la detección de la respuesta del material puede usarse para otros fines.

### Ejemplos

Las propiedades ventajosas del sensor auto oscilante se presentan tanto en un entorno protegido magnéticamente como abierto. Se presenta una demostración de detección de defectos mediante tomografía de inducción magnética en una muestra de acero al carbono ferromagnético. La configuración discutida puede proporcionar un sistema de detección de defectos de material no destructivo simple y robusto basado en un magnetómetro atómico.

Las mediciones que se describen más abajo se realizan en dos configuraciones: un magnetómetro atómico de rf en un entorno blindado [28-30] y otro abierto [6-8]. En el entorno protegido, exploramos las propiedades fundamentales del máser de espín. Comparamos la respuesta atómica a la unidad de radiofrecuencia con y sin un circuito de retroalimentación. Se presenta la implementación del máser de espín en la obtención de imágenes de defectos en una placa de acero al carbono a través del MIT con un magnetómetro atómico de rf sin blindaje. Hasta ahora, en el contexto de la magnetometría, la acción del máser de espín en un sistema de rf se ha explorado principalmente en el contexto de las mediciones geomagnéticas [23, 26]. Los circuitos de retroalimentación también se han estudiado en magnetómetros atómicos auto oscilantes [31-33]. Se demostró que los sensores suministran un ancho de banda (~5 kHz) superior al indicado por el ancho de línea del perfil de coherencia espectral. Las demostraciones anteriores de un máser de espín de metales alcalinos incluyen también acoplamientos no lineales, es decir, la combinación de dinámicas de espín no lineales impulsadas por un haz láser polarizado linealmente y bombeo óptico indirecto [34]. El caso descrito aquí explota la respuesta lineal del sistema atómico.

Configuración experimental. En un entorno protegido, el campo magnético ambiental se suprime al usar cinco capas de escudos cilíndricos con tapas en los extremos, fabricados con mu-metal de 2 mm de espesor [28-30, 34]. Un solenoide situado en el interior de la pantalla genera un campo magnético desplazado bien controlado. En la configuración abierta, las mediciones se realizan en un entorno sin apantallamiento magnético, donde el campo magnético desplazado se estabiliza activamente mediante tres pares de bobinas de Helmholtz cuadradas, ortogonales y anidadas [3, 6-8, 35]. En ambas configuraciones, el vapor atómico de cesio se aloja en una célula recubierta de parafina a temperatura ambiente (densidad atómica  $n_{Cs}=0,33 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ). Los átomos son bombeados ópticamente por un haz láser polarizado circularmente que se propaga a lo largo de la dirección del campo desplazado, Figura 1. El haz se proporciona por un láser de diodo, de frecuencia estabilizada a la transición  $6^2S_{1/2} F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=2$  (línea D2, 852 nm). La evolución del espín atómico colectivo se mapea sobre el estado de polarización del haz de sonda polarizado linealmente [29, 36, 37]. El haz de sonda se sincroniza con el desfase de fase al haz de la bomba, llevándolo a 800 MHz azul desplazado de los  $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=5$  transición. La luz láser transmitida a través de la célula se analiza mediante un polarímetro que consiste de un polarizador de cristal orientado a  $45^\circ$  con respecto a la polarización incidente y un fotodetector equilibrado comercial. La señal resultante se mide mediante un amplificador de bloqueo referenciado a la frecuencia de campo de excitación rf o una placa de adquisición de datos de 2 MS/s.

Configuración blindada. El funcionamiento del magnetómetro de rf en el modo estándar y en la configuración de máser de espín se compara a través de la desviación de Allan de la amplitud de la señal. Nuestro objetivo es ilustrar la ventaja

de la sintonización autónoma del sistema máser de espín a la resonancia de rf. Para simular el efecto de un entorno ruidoso, se redujo la estabilidad de la fuente de corriente (Keithley 6220) que acciona las bobinas de campo desplazado y define la frecuencia de resonancia de rf. La Figura 5 muestra la dependencia del tiempo de la incertidumbre estadística de la amplitud del magnetómetro de rf en la configuración estándar (círculos rojos), donde el campo de rf es producido por un generador de forma de onda sintonizable y en el modo máser de espín (rombos negros). En el primer caso, las derivas en el campo magnético desplazado provocan una desviación de la dependencia de  $\sim\sqrt{\tau}$  (línea azul discontinua) para un tiempo de integración superior a 10 ms. La dependencia de la incertidumbre estadística de amplitud en el tiempo de integración ( $\sim\sqrt{\tau}$ , marcado con una línea azul discontinua) indica un carácter de "ruido blanco" dominante. La estabilidad de la amplitud de oscilación del máser de espín se limita por las fluctuaciones en la energía del haz de sonda que se suministra al sistema a través de una fibra monomodo que mantiene la polarización.

Una de las propiedades características del máser de espín es la oscilación de "arranque", es decir, la variación periódica transitoria en la amplitud de oscilación del máser al comienzo de la operación del máser [19]. La variación de amplitud es equivalente a las observadas en cualquier sistema, con un circuito de retroalimentación de alta ganancia, que se acerca a un estado estacionario después de un cambio repentino en las condiciones de operación. En la Figura 6 se muestran dos escenarios en los másers de espín de metales alcalinos en los que podría observarse una dinámica transitoria: (a) al comienzo inmediato del funcionamiento del máser de espín en el campo de desplazamiento de 5,7  $\mu\text{T}$  y (b) en el caso de un salto de frecuencia significativo. Este último caso es causado por la variación del factor Q de la bobina con la frecuencia de operación. En particular, la Figura 6 muestra el comportamiento transitorio en la señal del magnetómetro auto oscilante observado cuando el campo magnético cambia, en términos de frecuencia de Larmor, de 5 kHz a 40 kHz. La medición se realizó con una energía de haz bomba/sonda de 500 mW/150 mW. No se observan oscilaciones de amplitud transitoria si el cambio de frecuencia es inferior a 1 kHz, que es el mayor cambio registrado en estos experimentos con objetos ferromagnéticos.

Máser de espín en la medición inductiva magnética. El máser de espín de metal alcalino descrito anteriormente se ha implementado en una configuración de imágenes inductivas magnéticas tomográficas. La medición se ejecuta en un entorno no blindado con la misma instrumentación ya descrita en [6-8]. La bobina de rf que genera el campo primario (1000 espiras de hilo de cobre de 0,2 mm de diámetro, altura de 10 mm, diámetros interior y exterior de 2 mm y 4 mm) se ha colocado  $\sim 3$  mm por encima de una placa de acero de 6 mm de espesor con una cavidad que imita un defecto estructural. La bobina de rf se conecta a la salida del fotodetector equilibrado, que controla la polarización del haz de sonda en el magnetómetro atómico situado a 200 mm por encima de la placa. La medida se configura en la denominada configuración de autocompensación [8]. En esta configuración, el eje del campo primario de rf es paralelo a la dirección del campo magnético desplazado y ortogonal a la superficie de la placa. El amplificador de bloqueo registra la amplitud de la señal atómica en función de la frecuencia de la señal. La generación de la acción de retroalimentación del máser de espín en el experimento inductivo es más compleja que la reportada en la parte anterior. La señal creada por la precesión espontánea del espín atómico en el campo desplazado se amplifica y se transfiere a la bobina del campo de rf primario. Esto excita una respuesta dentro de la placa (campo secundario) con una amplitud y dirección definidas por su estructura superficial.

Como el magnetómetro atómico es sensible sólo a componentes de campo de rf ortogonales al eje del campo magnético desplazado, la precesión del espín atómico sólo puede impulsarse por las componentes de campo secundarias paralelas a la superficie de la placa. Estos componentes sólo se vuelven distintos de cero en los alrededores de los bordes de la cavidad. En consecuencia, no hay acción de máser de espín fuera de los defectos, falta de homogeneidad o bordes, es decir, sobre la superficie homogénea de la placa. La condición para la retroalimentación positiva en el máser de espín requiere que la suma de todos los cambios de fase en el circuito de retroalimentación sea cero [23], en otras palabras, la coincidencia de fase entre la precesión del espín atómico y el impulso producido por el campo secundario. La fase del accionamiento se define por la dirección del campo secundario. Como se muestra en [8], el cambio en la dirección del campo secundario cubre todo el intervalo de valores posibles ( $360^\circ$ ) a medida que la bobina del campo primario se explora alrededor del perímetro de la cavidad. Esto se traduce en un vórtice en la fase de la señal detectada, es decir, la fase del impulso visto por los átomos. La acción del máser de espín sólo se activará por encima de la región del borde de la cavidad (es decir, para la dirección del campo secundario), lo que garantiza la condición de coincidencia de fase dentro de la muestra atómica. La selección de esta región se puede controlar introduciendo un cambio de fase entre la señal detectada y la bobina de rf. El cambio de la amplificación en el circuito de realimentación podría usarse para discriminar entre defectos de diferente tamaño y profundidad, ya que influyen en la resistencia del campo secundario. La Figura 7 muestra imágenes de un área de  $64 \times 64$  mm<sup>2</sup> de la placa que contiene una cavidad de 24 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad grabadas en los modos (a) estándar y (b) de autocompensación del máser de espín. El modo de funcionamiento del máser de espín garantiza que el valor registrado en la medición representa la amplitud de la resonancia del espectro de rf y, por tanto, elimina la necesidad de controlar todo el perfil espectral. Esto se traduce en una gran reducción del tiempo de adquisición de imágenes. El tiempo de grabación típico para la imagen en la Figura 7 (a), definido por la adquisición del espectro de rf en una sola ubicación  $\sim 8$  s, es de 12 horas. En las mismas condiciones de medición, toma  $\sim 25$  minutos adquirir la imagen en el modo máser de espín, Figura 7 (b-d). Este tiempo se limita al tiempo de movimiento del motor paso a paso. Debido a la condición de coincidencia de fase, sólo parte de la firma de la cavidad mostrada en la Figura 7 (a) puede verse en (b). La Figura 7 (c) muestra la imagen de la cavidad grabada con la misma bobina

de rf y un desplazamiento de fase de  $180^\circ$  con respecto al caso mostrado en (b). Esto indica que, para recuperar la firma completa de la cavidad, puede aplicarse un conjunto de bobinas, cada una con un desplazamiento de fase pertinente. En consecuencia, otra modalidad de la invención incluye un sistema como se describió anteriormente, pero con dos bobinas con una fase opuesta para registrar la imagen que se muestra en la Figura 7 (d). Aunque no se recupera toda la firma de la cavidad (es decir, el anillo), la medición demuestra que puede usarse un sistema multibobina para garantizar el enmascaramiento por rotación en todo el perímetro de la cavidad. La sintonización autónoma del sistema de máser de espín a la resonancia de rf permite grabar imágenes como las que se muestran en la Figura 7 (b-d) sin degradar la amplitud y el contraste incluso sin estabilización de campo activa. Esto simplifica drásticamente la instrumentación del sistema de obtención de imágenes, ya que el magnetómetro fluxgate y la electrónica de estabilización de campo, como las unidades PID, se vuelven obsoletas.

Como el cambio en la fase de la señal alrededor de la cavidad es monotónico, la dependencia de fase de la señal del máser de espín puede extraerse de la Figura 7 (b) y (c). Como se muestra en [8], la fase del campo secundario cambia monotónicamente a lo largo del perímetro de la cavidad, lo que permite calibrar el eje horizontal. La Figura 8 muestra el cambio de la amplitud de la señal leída a lo largo del perímetro de la firma de cavidad de la Figura 7 (b). La fase se establece arbitrariamente en  $0^\circ$  en el centro de la imagen y representa el caso de coincidencia perfecta entre la fase del impulso y las oscilaciones del espín atómico.

En conclusión, hemos demostrado el funcionamiento del máser de espín de metal alcalino en un entorno abierto y protegido magnéticamente. El carácter autoajutable de la medición contribuye a la lectura de la amplitud de la señal en la frecuencia de resonancia de rf, independientemente de las desviaciones del campo magnético de desplazamiento. Esto permite una gran mejora de la velocidad de captura de imágenes. También hemos presentado el funcionamiento de un sistema de varias bobinas de rf.

Todos los detalles, en particular las condiciones de funcionamiento, los parámetros y las dimensiones, de los ejemplos específicos pueden aplicarse a cualquier modalidad descrita en la presente descripción.

Todas las características y modificaciones opcionales y preferidas de las modalidades descritas y las reivindicaciones dependientes se pueden usar en todos los aspectos de la invención explicada en la presente descripción. Además, las características individuales de las reivindicaciones dependientes, así como también todas las características y modificaciones opcionales y preferidas de las modalidades descritas son combinables e intercambiables entre sí.

#### Referencias

1. C. Deans, L. Marmugi, S. Hussain y F. Renzoni, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 103503 (2016)
2. A. Wickenbrock, N. Leefer, JW Blanchard y D. Budker, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 183507 (2016).
3. C. Deans, L. Marmugi y F. Renzoni, *Opt. Exp.* **25**, 17911 (2017).
4. C. Deans, L. Marmugi y F. Renzoni, *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 083111 (2018);
5. C. Deans, L. Marmugi, and F. Renzoni, *Appl. Opt.* **57**, 2346 (2018).
6. P. Bevington, R. Gartman, W. Chalupczak, C. Deans, L. Marmugi y F. Renzoni, *App. Phys. Lett.* **113**, 063503 (2018).
7. P. Bevington, R. Gartman y W. Chalupczak, *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 013103 (2019).
8. P. Bevington, R. Gartman, y W. Chalupczak, *J. Appl. Phys.* **125**, 094503 (2019).
9. I. M. Savukov, S. J. Seltzer, y M. V. Romalis, *J. Magn. Res.* **185**, 214 (2007).
10. P. Ripka, M. Janosek, *IEEE Sensors J.* **10**, 1108 (2010).
11. T. Dogaru y S. T. Smith, *Nondestr. Test. Eval.* **16**, 31 (2000).
12. T. Dogaru and S. T. Smith, *IEEE Transactions on Magnetics* **37**, 5, 3831 (2001).
13. H. J. Krause y M. V. Kreuzbruck, *Physica C* **368**, 70 (2002).
14. J. Storm, P. Hommen, D. Drung, R. Korber, *App. Phys. Lett.* **110** 072603 (2017).
15. J. Belfi, G. Bevilacqua, V. Biancalana, R. Cecchi, Y. Dancheva y L. Moi, *Rev. sci. Instrum* **81**, 065103 (2010).
16. G. Bevilacqua, V. Biancalana, P. Chesssa, Y. Dancheva, *App. Phys. B* **122**, 103 (2016).
17. M. G. Richards, B. P. Cowan, M. F. Secca, y K. Machin, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **21**, 665 (1988).
18. T. E. Chupp, R. J. Hoare, R. L. Walsworth, y Bo Wu, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 2363 (1994).
19. R. E. Stoner, M. A. Rosenberry, J. T. Wright, T. E. Chupp, E. R. Oteiza, y R. L. Walsworth, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 3971 (1996).
20. D. Bear, T. E. Chupp, K. Cooper, S. DeDeo, M. Rosenberry, R. E. Stoner, y R. L. Walsworth, *Phys. Rev. A* **57**, 5006 (1998).
21. T. G. Walker, y W. Happer, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 629 (1997).
22. H. G. Dehmelt, *Phys. Rev.* **105**, 1924 (1957).
23. A. L. Bloom, *Appl. Opt.* **1**, 61 (1962).
24. E. S. Ensberg, *Phys. Rev.* **153**, 36 (1967).
25. El máser de espín de gas noble de baja densidad con detección óptica se describe en A. Yoshimi, K. Asahi, K. Sakai, M. Tsudab, K. Yogob, H. Ogawab, T. Suzuki y M. Nagakura, *Phys. Lett. A* **304**, 13 (2002) y A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, T. Nanao, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, N. Hatakeyama, S. Kagami, Y. Ichikawa, H. Miyatake y K. Asahi, *Phys. Lett. A* **376**, 1924 (2012).
26. M. J. Usher, W. F. Stuart, and S. H. Hall, *J. Sci. Instr.* **41**, 544 (1964).

27. Pei-Xian Miao, Wen-Qiang Zheng, Shi-Yu Yang, Bin Wu, Bing Cheng, Jian-Hui Tu, Hong-Liang Ke, Wei Yang, Ji Wang, Jing-Zhong Cui y Qiang Lin, *J. Opt. Soc. Am. B* 36, 819 (2019).
28. W. Chalupczak, R. M. Godun, P. Anielski, A. Wojciechowski, S. Pustelny, y W. Gawlik, *Phys. Rev. A* 85, 043402 (2012).
- 5 29. W. Chalupczak, R. M. Godun, S. Pustelny, y W. Gawlik, *Appl. Phys. Lett.* 100, 242401 (2012).
30. W. Chalupczak, P. Josephs-Franks, B. Patton, y S. Pustelny, *Phys. Rev. A* 90, 042509 (2014).
31. P. D. D. Schwindt, L. Hollberg, y J. Kitching, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 126103 (2005).
32. J. M. Higbie, E. Corsini, y D. Budker, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 113106 (2006).
- 10 33. J. Belfi, G. Bevilacqua, V. Biancalana, S. Cartaleva, Y. Dancheva, K. Khanbekyan, y L. Moi, *J. Opt. Soc. Am. B* 26, 910 (2009).
34. W. Chalupczak y P. Josephs-Franks, *Phys. Rev. Lett.* 115, 033004 (2015).
35. Y. Takahashi, K. Honda, N. Tanaka, K. Toyoda, K. Ishikawa y T. Yabuzaki, *Phys. Rev. A* 60, 4974 (1999).
36. M. Savukov, S. J. Seltzer, M. V. Romalis, y K. L. Sauer, *Phys. Rev. Lett.* 95, 063004 (2005).
- 15 37. D. Kleppner, H. M. Goldenberg, y N. F. Ramsey, *Phys. Rev.* 126, 603 (1962).

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de magnetómetro atómico, que incluye:
  - 5 una fuente de campo magnético variable (14) que se configura para proporcionar un campo magnético primario oscilante que haga que una muestra produzca un campo magnético secundario; un magnetómetro atómico (12) para detectar el campo magnético secundario; el magnetómetro atómico (12) que incluye:
    - 10 un espécimen atómico; un subsistema de bomba y sonda que se configura para bombear el espécimen atómico a fin de crear una polarización y sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con un haz de sonda; un detector que se configura para detectar el haz de sonda para producir una señal de detección que tiene una frecuencia de oscilación;
    - 15 el sistema se configura para accionar la fuente de campo magnético variable (14) en dependencia de la señal de detección con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de oscilación de la señal de detección.
  - 20 2. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en donde la fuente de campo magnético variable (14) se acopla a una salida del detector para accionarse en dependencia de la señal de detección.
  3. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en donde la fuente de campo magnético variable (14) se configura para colocarse adyacente a la muestra.
  - 25 4. El sistema de cualquier reivindicación anterior, que incluye un procesador de instrumentos que se configura para recibir la señal de detección y para determinar una amplitud y una fase de la misma.
  5. El sistema de cualquier reivindicación anterior incluye un seguidor de tensión que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable (14) con una señal tamponada a partir de la señal de detección.
  - 30 6. El sistema de cualquier reivindicación anterior incluye un amplificador que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable (14) con una señal amplificada a partir de la señal de detección.
  7. El sistema de cualquier reivindicación anterior incluye un desfasador que se configura para accionar la fuente de campo magnético variable (14) con una señal desfasada a partir de la señal de detección.
  - 35 8. El sistema de cualquier reivindicación anterior, que incluye una fuente de campo magnético de polarización que se configura para proporcionar al espécimen atómico un campo magnético de polarización en una dirección de campo de polarización.
  - 40 9. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en donde la fuente de campo magnético variable (14) es una bobina de rf; opcionalmente, en donde la fuente de campo magnético variable (14) se acciona en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf teniendo una señal de tensión dependiente de la señal de detección acoplada a través de la bobina de rf.
  - 45 10. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en donde el espécimen atómico incluye una colección de átomos de metales alcalinos; y/o en donde el espécimen atómico incluye un vapor atómico de metales alcalinos.
  - 50 11. El sistema de cualquier reivindicación anterior, que incluye un conjunto de fuentes de campo magnético variable configuradas para proporcionar el campo magnético primario oscilante, en donde el sistema se configura para accionar cada una de las fuentes de campo magnético variable en dependencia de la señal de detección con una frecuencia sintonizada a resonancia de rf y desfasada entre sí; el sistema incluye opcionalmente al menos un desfasador que se configura para accionar al menos uno del conjunto de fuentes de campo magnético variable con una señal desfasada a partir de la señal de detección.
  - 55 12. El sistema de cualquier reivindicación anterior, en donde el magnetómetro atómico (12) se configura para reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico (12) de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección primaria sustancialmente ortogonal a una superficie de la muestra.
  - 60 13. Un método de operar un magnetómetro atómico (12) para detectar un campo magnético secundario producido por una muestra, causado por un campo magnético primario oscilante proporcionado por una fuente de campo magnético variable, que incluye:
    - 65 bombear un espécimen atómico para crear una polarización y sondear la precesión de coherencia atómica dentro del espécimen atómico con un haz de sonda;

detectar el haz de sonda para producir una señal de detección;  
accionar dicha fuente de campo magnético variable (14) con una frecuencia correspondiente a una frecuencia de la señal de detección.

- 5 14. El método de la reivindicación 13, en donde accionar dicho campo magnético variable (14) en dependencia de la señal de detección incluye accionar la fuente de campo magnético variable (14) con una señal tamponada, y/o amplificada, y/o desfasada, a partir de la señal de detección.
- 10 15. El método de cualquiera de las reivindicaciones 13 a 14, incluye posicionar el espécimen atómico en un campo magnético de polarización; y/o determinar una amplitud y fase de la señal de detección para detectar el campo magnético secundario.

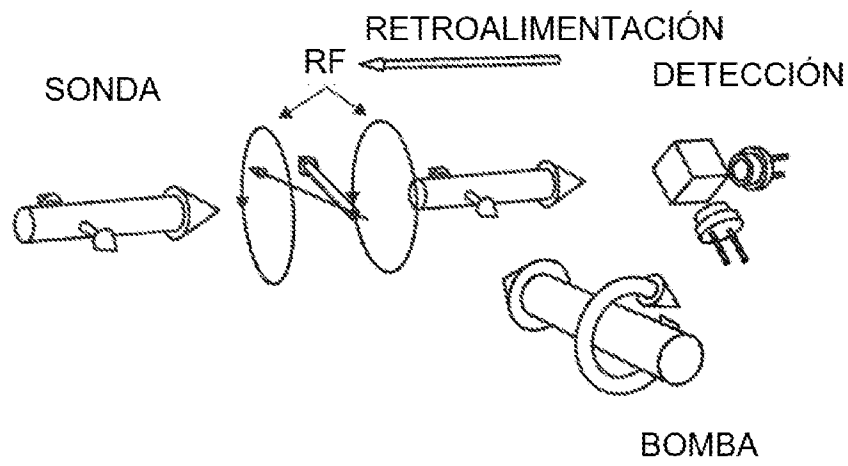


Figura 1

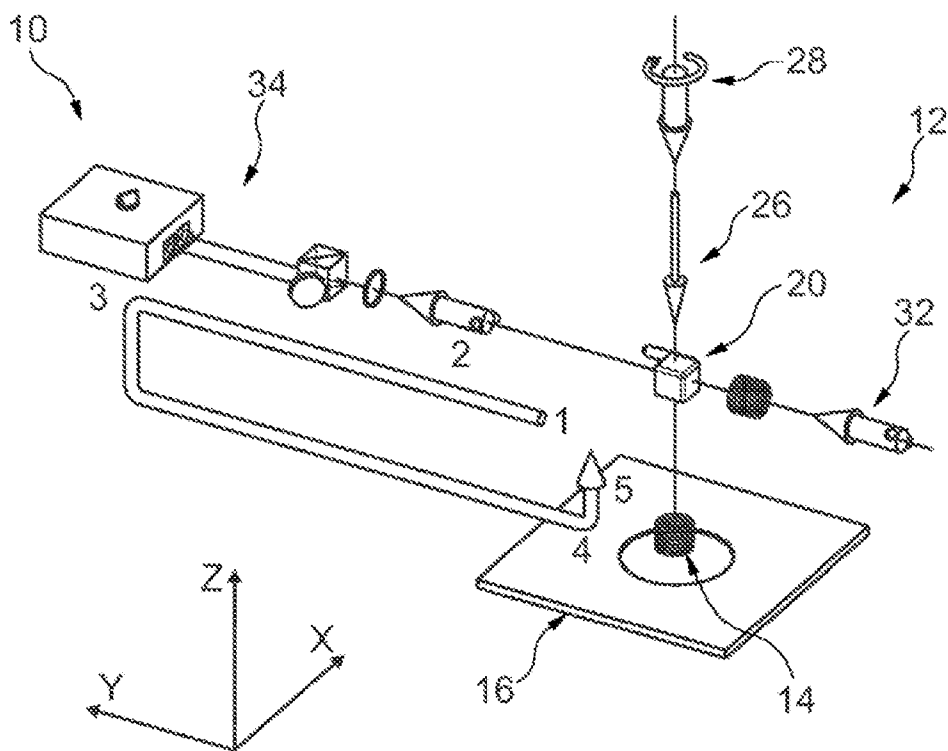


Figura 2



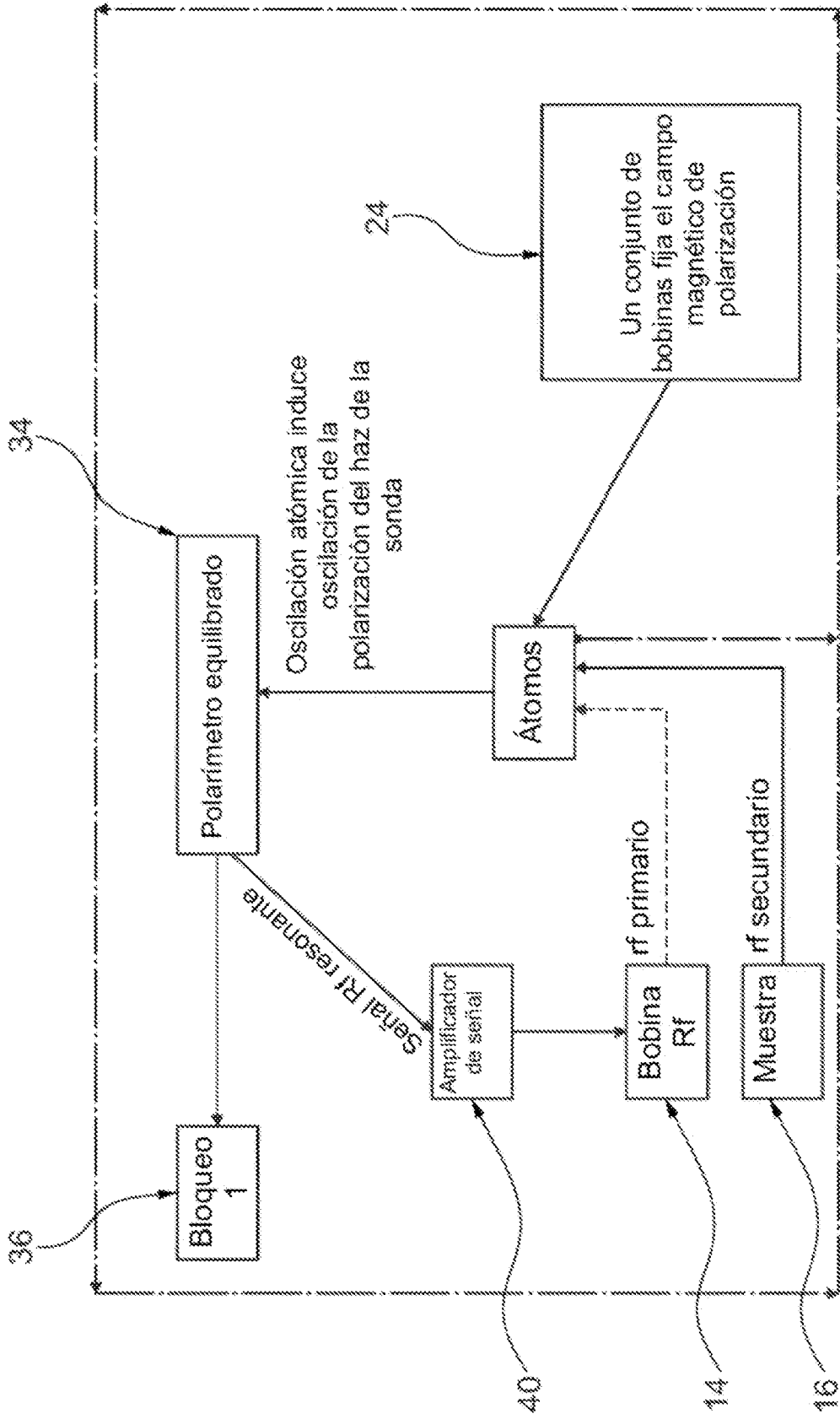


Figura 3

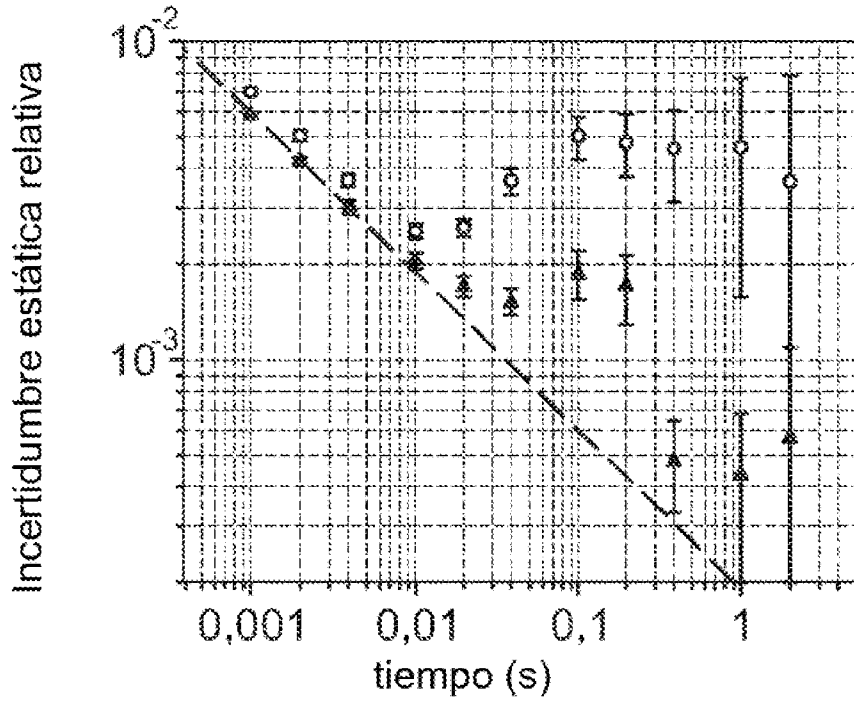


Figura 4

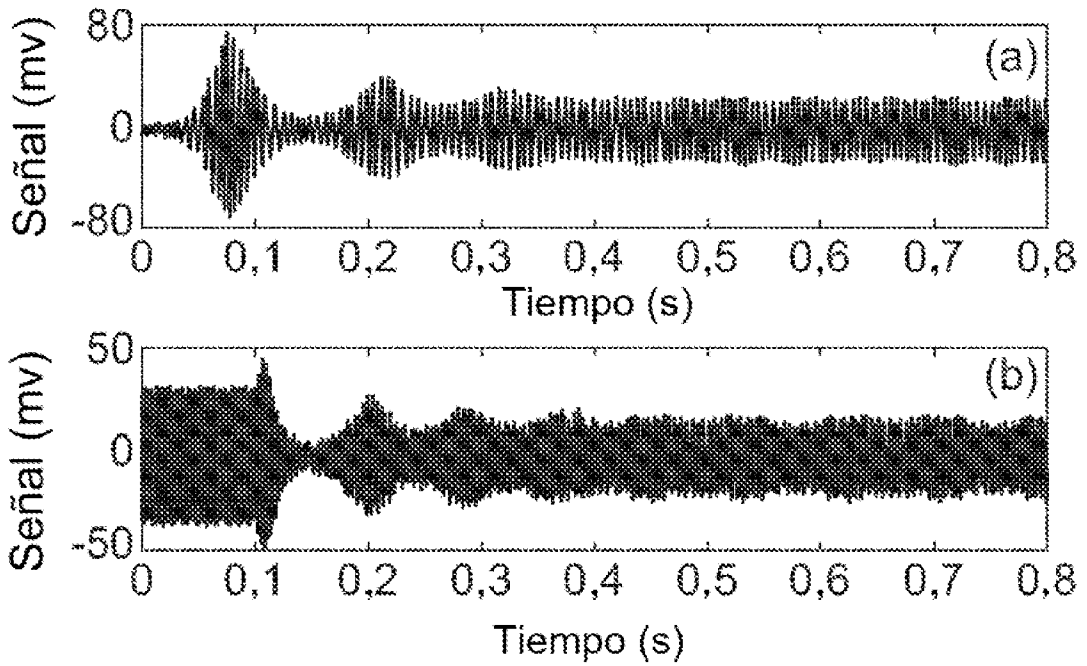


Figura 5

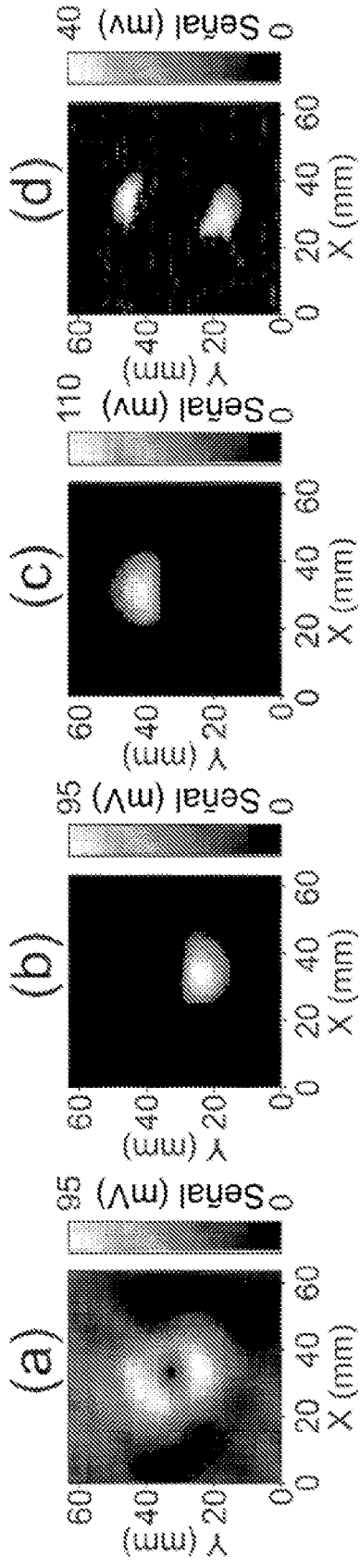


Figura 6

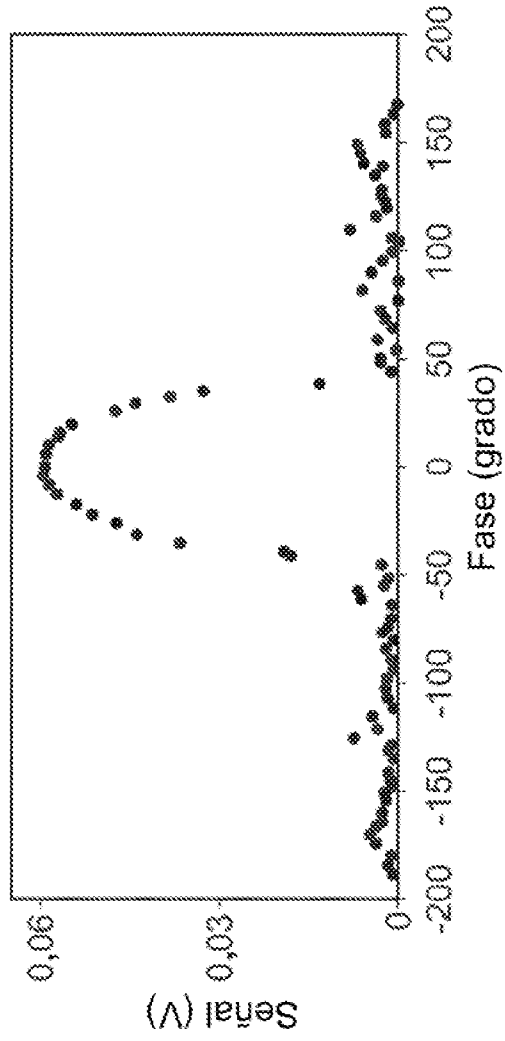


Figura 7

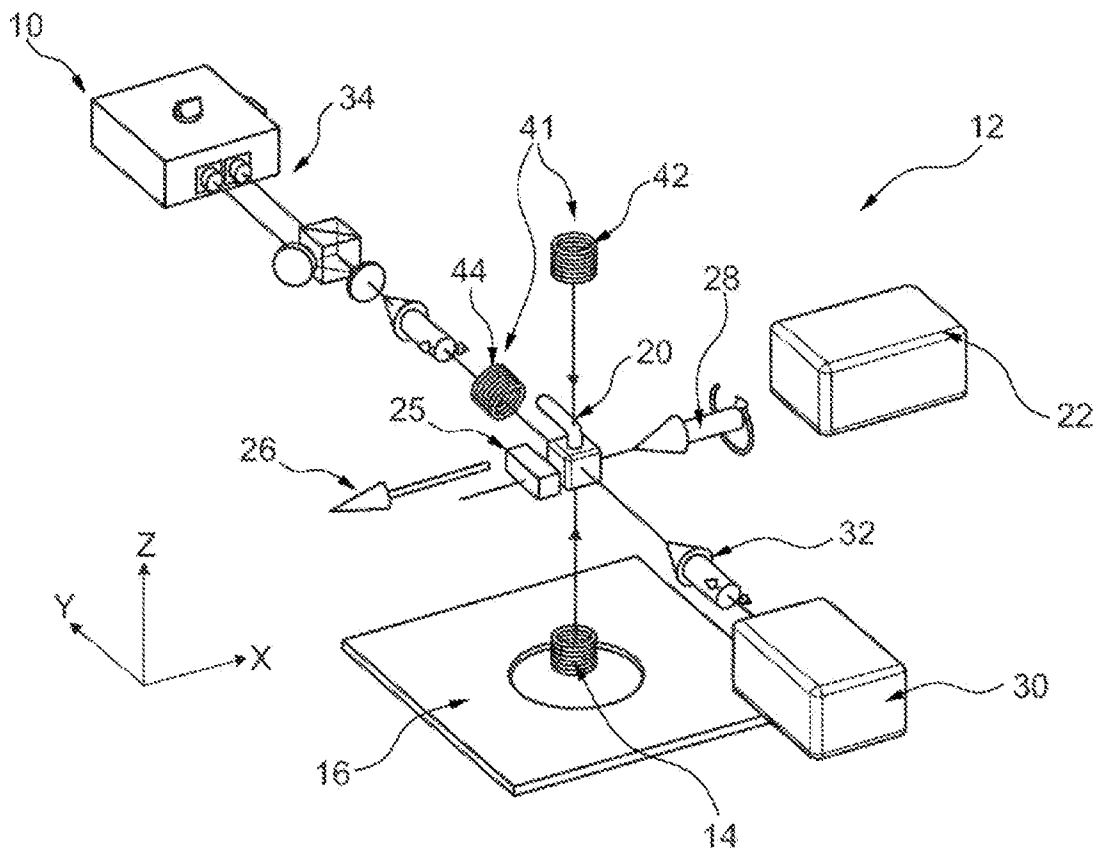


Figura 8