

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 992 289**

51 Int. Cl.:

G01N 24/00 (2006.01)

G01R 33/26 (2006.01)

G01N 27/82 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.07.2019 PCT/GB2019/051953**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.01.2020 WO20016557**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.07.2019 E 19748887 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2024 EP 3811068**

54 Título: **Método y sistema para detectar la respuesta de un material**

30 Prioridad:

20.07.2018 GB 201811928

24.08.2018 GB 201813858

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.12.2024

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 2 992 289 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y sistema para detectar la respuesta de un material

5 La invención se refiere a un método y sistemas para detectar la respuesta de un material.

En Apl. Phys. Lett. 108,183507 (2016), Arne Wickenbrock y otros describen "Obtención de imágenes por corrientes parásitas con un magnetómetro de radiofrecuencia atómica".

10 Los aspectos de la invención buscan proporcionar un método y un sistema mejorados para detectar la respuesta de un material.

De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un método para detectar la respuesta de un material, que incluye:

15 proporcionar un campo magnético primario oscilante para hacer que la muestra produzca un campo magnético secundario;
reducir el efecto sobre un magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a una superficie de una muestra;
20 detectar el campo magnético secundario con el magnetómetro atómico para detectar la respuesta material;
en donde reducir el 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:

25 proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico que incluye un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra; y/o
alinear un eje insensible del magnetómetro atómico con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

30 De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un sistema para detectar la respuesta de un material, que incluye:

una fuente del campo magnético para proporcionar un campo magnético primario oscilante que haga que una muestra produzca un campo magnético secundario;
un magnetómetro atómico para detectar el campo magnético secundario para detectar la respuesta de un material;
35 en donde el sistema se configura para reducir el efecto sobre un magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección primaria sustancialmente ortogonal a una superficie de la muestra;
en donde:

40 el sistema incluye una fuente del campo magnético compensatorio para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico que incluye un componente en la dirección primaria; y/o
el magnetómetro atómico tiene un eje insensible dispuesto en la dirección primaria.

45 En las reivindicaciones dependientes se proporcionan características opcionales de las modalidades de la invención.

En algunas modalidades, el método incluye detectar cambios en la conductividad eléctrica y/o permeabilidad magnética de la muestra a partir de la detección del campo magnético secundario.

50 En algunas modalidades, la fuente del campo magnético se configura para estar dispuesta en una relación no superpuesta con la muestra.

En algunas modalidades, el sistema incluye un ordenador que incluye un receptor para recibir una señal que se origina en el magnetómetro atómico y que representa una detección del campo magnético secundario, estando configurada el ordenador para determinar cambios en la conductividad y/o permeabilidad de la muestra en respuesta a la detección del campo magnético secundario.

60 También se describe en la presente descripción, pero no está cubierta por las reivindicaciones, un método para detectar la respuesta de un material, que incluye:

proporcionar un campo magnético primario oscilante para hacer que una muestra produzca un campo magnético secundario;
modulación de un campo magnético de polarización de un magnetómetro atómico;
65 detectar el campo magnético secundario con el magnetómetro atómico para detectar la respuesta material.

En algunas modalidades, se fija una frecuencia de oscilación del campo magnético primario.

En algunas modalidades, una frecuencia de modulación del campo magnético de polarización es menor, preferentemente en un orden de magnitud, que una frecuencia de oscilación del campo magnético primario.

En algunas modalidades, el método incluye demodular una señal, proporcionada por el magnetómetro atómico en respuesta a la detección del campo magnético secundario, para determinar una amplitud y/o una fase. En algunas modalidades, el método incluye demodular una señal, proporcionada por el magnetómetro atómico en respuesta a la detección del campo magnético secundario, con referencia a una frecuencia de oscilación del campo magnético primario, para proporcionar una señal parcialmente demodulada. En algunas modalidades, el método incluye demodular la señal parcialmente demodulada con referencia a una frecuencia de modulación del campo magnético de polarización para determinar una amplitud y/o fase de una señal proporcionada por el magnetómetro atómico en respuesta a la detección del campo magnético secundario.

También se describe en la presente descripción, pero no está cubierta por las reivindicaciones, un sistema para detectar la respuesta de un material, que incluye:

- un magnetómetro atómico para detectar un campo magnético secundario para detectar la respuesta de un material, comprendiendo el magnetómetro atómico una fuente del campo magnético de polarización para proporcionar un campo magnético de polarización;
- un modulador para modular el campo magnético de polarización.

En algunas modalidades, el sistema incluye una fuente del campo magnético primario para proporcionar un campo magnético primario oscilante.

En algunas modalidades, el sistema incluye una disposición demoduladora para determinar una amplitud y/o fase de una señal, proporcionada por el magnetómetro atómico en respuesta a la detección del campo magnético secundario.

En algunas modalidades, la disposición demoduladora incluye un receptor para recibir una señal proporcionada por el magnetómetro atómico en respuesta a la detección del campo magnético secundario y se configura para demodular la señal con referencia a una frecuencia de oscilación de un campo magnético primario o del mismo para proporcionar una señal parcialmente demodulada.

En algunas modalidades, la disposición demoduladora incluye un receptor para recibir una señal de modulación del modulador y se configura para demodular la señal parcialmente demodulada con referencia a la señal de modulación para permitir la determinación de una amplitud y/o fase de la señal parcialmente demodulada.

En algunas modalidades, la fuente del campo magnético de polarización incluye una disposición de bobina.

Los métodos de la reivindicación de método independiente y de otros aspectos de la invención, y opcionalmente también las características de una o más de las reivindicaciones dependientes y/o características opcionales de aspectos de la invención, pueden combinarse en algunas modalidades de la invención.

Los sistemas de la reivindicación independiente del sistema y de otros aspectos de la invención, y opcionalmente también las características de una o más de las reivindicaciones dependientes y/o características opcionales de aspectos de la invención, pueden combinarse en algunas modalidades de la invención.

La respuesta material puede ser una respuesta de la muestra al campo magnético primario y esto puede incluir respuesta atómica, magnetización, corrientes parásitas y otras respuestas. El campo magnético secundario puede ser indicativo de la respuesta material y en algunas modalidades la respuesta material puede incluir o ser el campo magnético secundario.

Proporcionar un campo magnético compensatorio puede incluir la operación de un dispositivo de bobina de compensación para producir el campo magnético compensatorio.

En algunas modalidades, el método puede incluir variar o ajustar una o más distancias desde una celda de detección del magnetómetro atómico de una o más bobinas de la disposición de bobinas de compensación, de modo de reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de uno o más componentes de los campos magnéticos primarios y/o secundarios. Por ejemplo, para reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de cualquier componente del campo magnético primario y/o secundario, el método puede incluir variar o ajustar una distancia desde la celda de detección de una bobina de compensación que tiene un eje en una dirección de ese componente.

Preferiblemente, el campo magnético compensatorio es un campo magnético oscilante.

Preferiblemente, el campo magnético compensatorio se hace oscilar con la misma frecuencia que el campo magnético primario para mantener una diferencia de fase constante entre ellos.

Proporcionar un campo magnético primario oscilante sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra para hacer que la muestra produzca un campo magnético secundario puede incluir la operación de una disposición de bobina de rf para proporcionar el campo magnético primario.

- 5 En algunas modalidades, la fuente del campo magnético para proporcionar un campo magnético primario oscilante incluye una bobina de rf con o sin un núcleo sólido.

En algunas modalidades, el campo magnético primario oscila a una frecuencia de rf, por ejemplo en el intervalo de 1 Hz a 1 GHz.

- 10 En algunas modalidades, la fuente del campo magnético para proporcionar un campo magnético primario oscilante puede configurarse para estar dispuesta completamente en un lado de una superficie de muestra.

- 15 En algunas modalidades, el sistema puede configurarse para disponerse completamente en un lado de la superficie de la muestra.

- 20 El método y/o sistema puede ser para detectar la respuesta de un material para una variedad de propósitos, por ejemplo, para obtener imágenes de defectos del material y/o para detectar la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética del material. En algunas modalidades, el método y/o puede usarse para la detección de corrosión bajo aislamiento (CUI). En algunas modalidades, el método y/o sistema puede usarse para detectar el estado de estructuras de hormigón armado. En algunas modalidades, el método y/o sistema pueden usarse para la localización de objetos.

- 25 En algunas modalidades, el magnetómetro atómico es un magnetómetro atómico de radiofrecuencia.

En algunas modalidades, la muestra tiene una alta permeabilidad magnética y el campo magnético secundario está dominado por la magnetización secundaria. Sin embargo, en otras modalidades (muestras altamente conductoras), el campo magnético secundario queda dominado por el campo generado por las corrientes parásitas.

- 30 Algunas modalidades pueden proporcionar una mejora en la obtención de imágenes de defectos del material con un magnetómetro atómico de radiofrecuencia.

Las modalidades de la invención se describen más abajo, a manera de ejemplo únicamente, con referencia a las figuras que se acompañan.

- 35 La Figura 1(a) muestra un sistema para detectar la respuesta de un material de acuerdo con una modalidad de la invención.

- 40 La Figura 1 (b) muestra una transición de Cesio.

La Figura 1(c) muestra cómo se forman los campos magnéticos secundarios en algunas instancias.

- 45 La Figura 2 muestra una simulación de los componentes del campo secundario b_y y b_z (marcados con líneas discontinuas rojas y sólidas azules respectivamente) a medida que la bobina se desplaza a lo largo del eje y a través del centro de la cavidad en la modalidad de la Figura 1. Los valores máximos de b_y , y b_z dentro de los límites de la cavidad se denominan $b_{y,máx}$, y $b_{z,máx}$.

- 50 La Figura 3 muestra un cambio modelado en la fase de la señal (línea negra punteada) y la amplitud (línea roja sólida) de la señal de resonancia magnética sobre una cavidad registrada por un magnetómetro para varias amplitudes de los componentes del campo primario. El eje vertical de la matriz de imágenes representa cambios en el componente vertical, mientras que el eje horizontal representa cambios en el componente horizontal del campo primario. Amplitud expresada en unidades de $b_{y,máx}$, y $b_{z,máx}$.

- 55 La Figura 4 muestra (a) la amplitud y (b) el contraste de fase medidos para diferentes ubicaciones de una bobina vertical (bobina de compensación sobre la celda de vapor) desde el punto de compensación. Para cada posición de la bobina vertical, se ajustó la posición de la bobina horizontal para lograr un perfil simétrico. Los cuadrados verdes en (a) representan el cambio en la amplitud de la señal de espectroscopia de rf. La línea azul/roja sólida muestra el contraste de amplitud/fase en ausencia del campo de compensación.

- 60 La Figura 5:

(a)-(c)/ (g)-(i): El cambio medido de la amplitud/fase de la señal de espectroscopia de rf en un área de 64 x 64 mm² área 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 para tres valores del componente horizontal del campo de rf de compensación alrededor del punto de compensación.

- 65 (d)-(f)/ (j)-(l): Las secciones transversales verticales a través del centro de las imágenes de amplitud/fase.

Las imágenes se han grabado a 114,2 kHz.

La Figura 6 muestra una configuración experimental de acuerdo con otra modalidad de la invención.

La Figura 7 muestra el cambio medido de la amplitud de la señal de espectroscopia de rf en un área de 64 x 64 mm² área de una placa de Al de 6 mm de espesor que contiene una cavidad de 24 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad registrado con tres configuraciones de medición: (a) sin compensación de campo de rf, (b) con compensación realizada con dos bobinas de rf (Figura 1), (c) y con campo magnético de polarización rotado y bobinas de compensación (Figura 6).

La Figura 8 es un diagrama de sistema de una modalidad de la invención.

La Figura 9 muestra gráficos del escaneo.

Las Figuras 11 y 12 son diagramas de sistema de modalidades de la invención.

En modalidades de la invención, la obtención de imágenes de los defectos estructurales puede realizarse con un magnetómetro atómico de radiofrecuencia al registrar la respuesta de un material al campo de excitación de radiofrecuencia. Más abajo se describen dos ejemplos de configuraciones de medición que permiten aumentar la amplitud y el contraste de fase de las imágenes que representan un defecto estructural en muestras paramagnéticas y ferromagnéticas. Ambos ejemplos implican una eliminación del componente del campo de excitación de la señal del magnetómetro atómico. El primer ejemplo se implementa con un conjunto de bobinas que compensan directamente el campo de excitación en la señal del magnetómetro. El segundo ejemplo aprovecha el hecho de que el magnetómetro de radiofrecuencia no es sensible al campo magnético oscilante a lo largo de uno de sus ejes. Se discuten en detalle los resultados del modelado que confirman la observación experimental. Se hace referencia a Bevington, Patrick y Gartman, Rafal y Chalupczak, Witold y Deans, Cameron y Marmugi, Luca y Renzoni, Ferruccio. (2018) "Non-Destructive Structural Imaging of Steelwork with Atomic Magnetometers" (Artículo 1), el cual se puede encontrar en <https://www.researchgate.net/publication/326060467> Non-Destructive Structural Imaging of Steelwork with Atomic Magnetometers.

También se hace referencia a Bevington, Gartman & Chalupczak "Imaging of material defects with a radio-frequency atomic magnetometer" Revisión de Instrumentos Científicos 90, 013103 (2019); doi 10.1063/1.5053959 (Artículo 2), una versión del cual se adjuntó como Anexo 1 a la solicitud de patente del Reino Unido números GB1811928.9 y GB1813858.6 de la que se reivindica prioridad.

El Artículo 1 y el Artículo 2 proporcionan contexto a la invención y cualquiera de las características estructurales o de método, o aplicaciones, descritas en el Artículo 1 o el Artículo 2 son aplicables a las modalidades de la invención, por medio de modificación o adición.

La implementación de campos magnéticos de radiofrecuencia en ensayos no destructivos proporciona opciones rentables para la detección de defectos estructurales, particularmente en casos en los que no hay acceso directo a la superficie de la muestra estudiada. La técnica puede implicar el monitoreo de la respuesta del material al llamado campo magnético primario (\vec{B}) creado por una bobina de rf [1]. La respuesta del material puede detectarse de diversas maneras. Tradicionalmente, esto se logra monitoreando la impedancia de la bobina de rf (o una bobina de captación dedicada) [1-5]. Sin embargo, la simplicidad de la instrumentación en este tipo de medición se ve superada por la degradación de la sensibilidad de la señal a bajas frecuencias. Otras opciones implican la implementación de sensores magnéticos como los magnetómetros de magnetorresistencia gigante (GMR) [6-8], los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID) [9-10] y los magnetómetros de radiofrecuencia [11-14]. Los sensores de campo magnético monitorizan directamente la respuesta del llamado campo magnético secundario (\vec{b}) en el medio. El campo secundario es producido por el campo magnético primario a través de corrientes parásitas excitadas en muestras altamente conductoras, o magnetización inducida en muestras con alta permeabilidad [15], y contiene firmas de las inhomogeneidades/defectos estructurales dentro de la muestra.

Las modalidades de la presente invención usan magnetómetros atómicos de rf y pueden usarse para obtener imágenes de defectos del material.

Como se describió anteriormente, las modalidades de la presente invención aumentan la amplitud y/o el contraste de fase de la salida del sistema.

En algunas modalidades, esto se logra al reducir el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes de los campos magnéticos primarios y secundarios en una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de una muestra. Esto se describe más abajo en relación con dos modalidades, las cuales implican una eliminación de los componentes de campo primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra de la señal del magnetómetro atómico.

Se muestra en la presente descripción que la eliminación del componente de campo primario de la señal del magnetómetro aumenta significativamente el contraste de fase/amplitud de las imágenes. Esto puede proporcionar una indicación relativamente rápida de un defecto en pruebas no destructivas de muestras de áreas grandes. Los conceptos se exploran en el contexto de muestras paramagnéticas (aluminio) y ferromagnéticas (acero al carbono).

Como puede verse en la Figura 1(a), una modalidad de la invención incluye un sistema 10 que incluye un magnetómetro atómico de radiofrecuencia 12 y una fuente del campo magnético primario 14 para proporcionar un campo magnético primario oscilante a una frecuencia de rf. En esta modalidad, la fuente del campo magnético primaria 14 es una bobina de rf; sin embargo, pueden usarse otras fuentes de campo magnético en otras modalidades.

En esta modalidad, la bobina de rf 14 es una bobina de 1000 vueltas con un cable de 0,02 mm, enrollado sobre un núcleo de plástico de 2 mm (diámetro interior) y con un ancho de 4 mm (diámetro exterior) y una longitud de 10 mm.

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

La bobina de rf 14 se configura de modo que pueda colocarse adyacente a una muestra 16, pero completamente en un lado de la misma y en una relación no superpuesta con la misma, y puede operarse para generar un campo magnético primario oscilante para hacer que la muestra produzca un campo magnético secundario. El campo magnético secundario es indicativo de la respuesta de un material de la muestra. Se hace referencia a la Figura 1(c).

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

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

- un campo magnético secundario en la misma dirección que el campo primario aplicado - *la magnetización secundaria*, y
- campo magnético inducido por corrientes parásitas en dirección opuesta al campo primario aplicado - *el campo magnético inducido por corrientes parásitas*.

La Figura 1(a) muestra los componentes principales de una configuración experimental. En este ejemplo, el campo magnético secundario es producido por corrientes parásitas excitadas en una muestra (en este caso una placa de Al con una cavidad de 48 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad) por el campo primario creado por la bobina de rf. La señal del magnetómetro atómico normalmente combinaría componentes creados por el campo primario generado por la bobina de rf y el campo magnético secundario.

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. Los detalles del magnetómetro atómico se describen en W. Chalupczak, RM Godun, S. Pustelny y W. Gawlik, Appl. Phys. Lett. 100, 242401 (2012). Dado que la configuración experimental es similar a la descrita en [17,15], aquí solo se discutirán brevemente algunos componentes.

El magnetómetro atómico 12 incluye una celda de detección 20, que en esta modalidad es de 1 cm³ celda de vidrio recubierta de parafina que contiene vapor atómico de cesio a temperatura ambiente (para el cual la densidad atómica es $n_{Cs} = 3,3 \times 10^{10}$ centímetro⁻³).

El magnetómetro incluye una fuente del campo magnético de polarización 24 (no mostrada en la Figura 1(a)) configurada para proporcionar un campo magnético de polarización 26 en la celda de detección 20 en una dirección de campo magnético de polarización.

Para realizar una compensación activa del campo ambiental y de cualquier campo magnético de CC residual creado por la muestra, el magnetómetro incluye un fluxgate 25 ubicado junto a la celda de vapor 20 y tres unidades PID (en esta modalidad SRS 960). En esta modalidad, el fluxgate es Bartington Mag690. Con compensación pasiva y activa del campo ambiental, el ancho de línea del perfil espectral de rf es de aproximadamente 30 Hz. El pequeño tamaño de la celda de detección 20 puede proporcionar inmunidad parcial a los gradientes de campo ambiental.

El magnetómetro incluye un láser de bombeo 22 configurado para bombear los átomos en la celda de detección 20 con un haz láser de bombeo 28 polarizado circularmente, en esta modalidad a 377 μ W, frecuencia bloqueada al cesio de transición $6^2S_{1/2}F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}F'=2$ (línea D2, 852 nm) propagándose a lo largo del campo magnético de polarización 26.

El magnetómetro atómico incluye un láser de sonda 30 configurado para sondear la precesión del espín atómico en la celda de detección 20 con un haz láser de sonda polarizado linealmente 32 bloqueado en fase con respecto al haz de bombeo y ortogonal al campo magnético de polarización 26.

El magnetómetro atómico incluye un polarímetro balanceado 34 configurado para recibir el haz láser de sonda después de pasar a través de la celda de detección 20 y detectar la rotación de Faraday. El polarímetro balanceado se configura para proporcionar una señal de salida electrónica que representa la detección de rotación de Faraday.

5 El eje 14 de la bobina de rf es ortogonal tanto al haz de la bomba como al de la sonda.

10 El sistema 10 incluye un controlador de oscilación de campo primario en forma de un amplificador de bloqueo 36 (no mostrado en la Figura 1(a)) configurado para operar la bobina de rf 14 al proporcionar corriente en la misma que oscila a una frecuencia de rf para generar el campo magnético primario y para controlar la frecuencia y fase de la corriente en la bobina de rf 14 y, de esta manera, también del campo magnético primario, e incluye un receptor para recibir la señal de salida del polarímetro balanceado del magnetómetro atómico. El amplificador de bloqueo 36 puede configurarse para proporcionar corriente modulada en frecuencia en la bobina de rf para proporcionar un campo magnético primario modulado en frecuencia, aunque esto no es necesario en todas las modalidades. El amplificador de bloqueo se configura para demodular la señal de salida del polarímetro balanceado con referencia a la frecuencia de corriente o modulación de la bobina de rf 14, y para proporcionar una primera señal de salida, por ejemplo a un ordenador para obtener una amplitud y/o fase de la señal. El amplificador de bloqueo sirve de esta manera como un demodulador. El ordenador puede usar la amplitud de la señal para detectar la respuesta de un material de la muestra y, en algunos casos, para realizar imágenes de defectos del material.

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

25 Esta modalidad usa un entorno sin protección magnética donde los campos estáticos a lo largo de las direcciones y y z se anulan y un campo de polarización a lo largo de la dirección x se crea mediante tres pares de bobinas de Helmholtz cuadradas anidadas mutuamente ortogonales [18] con dimensiones de 1 m, 0,94 m y 0,88 m respectivamente (longitud de bobina más grande 1 m). Las bobinas de Helmholtz forman una disposición de bobinas para la compensación activa y pasiva del campo magnético ambiental, para reducir los ruidos y para estabilizar y ajustar la dirección y la resistencia del campo magnético de polarización. En otras palabras, la disposición de bobina proporciona la fuente del campo magnético de polarización.

30 La señal de medición proviene del cambio de fase y amplitud en los espectros de resonancia de rf registrados por el magnetómetro atómico de rf a medida que una muestra se mueve debajo de la bobina de rf (Figura 1(a)). La bobina de rf que produce \vec{B} se impulsa por la salida de la referencia interna del amplificador de bloqueo 36.

35 En la configuración experimental mostrada y descrita, las muestras se fijan a una platina de traslación 2D controlada por ordenador. La muestra 16 se ubica aproximadamente a 30 cm de la celda y la bobina se coloca 1 mm - 2 mm por encima de la superficie de la muestra en el mismo eje que la celda.

40 La resistencia del campo de polarización ($\vec{B}_{\text{polarización}}$) define la frecuencia de operación del sistema (12,6 kHz en esta modalidad, aunque pueden usarse otras frecuencias, por ejemplo en el intervalo 10 kHz - 20 kHz), es decir la frecuencia de la resonancia magnética y la frecuencia del campo primario requerida.

45 En operación, la precesión del espín atómico coherente es impulsada por el campo de rf. La superposición de los campos primario y secundario altera este movimiento, que se detecta con el haz láser de sonda polarizado linealmente 32 que se propaga ortogonalmente al campo magnético de polarización 26. Los átomos de Cs se bombean ópticamente al estado estirado ($F=4$, $m_F=4$) con el láser de bombeo 22 polarizado circularmente que se bloquea en los Cs de transición $6^2S_{1/2}F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}F'=2$ (línea D2, 852 nm) que se propaga a lo largo del campo

50 magnético de polarización $\vec{B}_{\text{polarización}}$. El haz de la sonda (30 μW) se desfasa con respecto al haz de la bomba, con lo que se desplaza 580 MHz hacia el azul desde la transición $6^2S_{1/2}F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}F'=5$ (línea D2, 852 nm). La precesión de espín coherente de los átomos de Cs se acopla a la polarización del haz de sonda (rotación de Faraday) que se detecta con el polarímetro balanceado, cuya señal es luego procesada por el amplificador de bloqueo 36 referenciado a la fase del campo de rf.

55 Para las imágenes, esto puede realizarse para cada píxel de la superficie de la muestra, a medida que se mueve la muestra o el sistema.

60 La persona experta apreciará que el magnetómetro atómico particular descrito anteriormente no es el único tipo de magnetómetro atómico que puede usarse; por ejemplo, diferentes celdas de detección, diferentes dimensiones, diferentes potencias, diferentes frecuencias de láser, y diferentes transiciones pueden ser empleadas según sea apropiado. En particular, pueden usarse átomos distintos de los de Cs en estado sólido, líquido y/o forma de vapor, y las frecuencias y potencias pueden ajustarse en consecuencia. Además, pueden variarse los medios de bombeo, generación de campo, traslación y detección del haz de sonda. Por ejemplo, el subsistema de bombeo y sonda puede usar uno, dos, tres o más láseres para realizar el bombeo y el sondeo, y las polarizaciones de los haces

pueden variarse en algunas modalidades. El polarímetro balanceado puede reemplazarse con cualquier detector de haz de sonda que sea preferentemente un fotodetector que pueda detectar la polarización y/o amplitud del haz de sonda.

Los inventores han analizado previamente la forma de los perfiles espaciales generados por la cavidad en las placas de aluminio [15]. El perfil representa variaciones en la fase y amplitud de la señal de espectroscopia de rf registrada por el magnetómetro atómico. Contiene contribuciones del campo magnético primario y secundario. Una fuerte contribución del campo primario en la señal del magnetómetro da como resultado el mapeo de dos componentes ortogonales del campo secundario, b_z y b_y , sobre la amplitud y fase de la señal de espectroscopia de rf respectivamente. Los inventores han observado que la componente del campo secundario, b_y , paralela a la superficie de la muestra cambia de signo en los alrededores de la grieta superficial (cavidad). Como consecuencia de un fuerte campo primario, las variaciones en el campo resultante registradas por el magnetómetro atómico de rf miden el cambio de dirección del componente del campo secundario, sin embargo, el cambio de fase de la señal de rf observado es menor que el cambio real en b_y .

Haciendo referencia nuevamente a la Figura 1(a), en esta modalidad de la invención, el sistema incluye una fuente del campo magnético compensatorio 40 para proporcionar un campo magnético compensatorio oscilante, también llamado campo magnético de compensación, en el magnetómetro atómico, específicamente en la celda de detección 20, incluyendo un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra 16 que reduce y preferentemente elimina 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 excitación \vec{b} .

Como puede verse en la Figura 1(a), en esta modalidad la fuente del campo magnético compensatorio 40 es una disposición 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 está ubicada entre el láser de sonda 30 y la segunda bobina de compensación 44, y la segunda bobina de compensación 44 está ubicada entre la celda de detección 20 y el polarímetro balanceado 34, aunque esto no es necesario en todas las modalidades.

La disposición de bobina compensatoria 40 se configura para proporcionar, en la celda de detección 20, un campo magnético compensatorio \vec{B}_c .

En otras palabras, un conjunto de dos bobinas de rf orientadas en las direcciones z e y (Figura 1(a)) crea un campo magnético oscilante, \vec{B}_c , que compensa el campo primario visto por el magnetómetro atómico. Las bobinas se accionan por la salida de la referencia interna del mismo amplificador de bloqueo 36 usado 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 se compensa en la celda de vapor mediante un conjunto de dos bobinas de rf orientadas en las direcciones z e y.

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

Las amplitudes de las dos componentes de \vec{B}_c pueden variarse modificando la distancia de las bobinas correspondientes a 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 $\vec{b} + \vec{B} + \vec{B}_c = \vec{b} + \vec{B}$.

La configuración permite determinar la amplitud y la fase (orientación) de la rf en el plano yz. 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 de rf describe cambios en el campo resultante, donde $b_z + B'_z$ y $b_y + B'_y$ son los dos componentes en cuadratura de la señal de rf.

Comenzamos con un modelo de \vec{b} en el caso de un escaneo 1D de la posición de la bobina de rf en dirección \hat{y} a través del centro de la cavidad (Figura 1(a)) en muestras conductoras (el experto apreciará que se podría hacer un argumento similar, como más abajo, basándose en la magnetización para muestras con una permeabilidad magnética). Sólo en esta geometría b_y y b_z se producen componentes. La Figura 2 muestra la dependencia de los componentes del campo de rf secundario en la posición de la bobina de rf. En una muestra homogénea el flujo de la corriente parásito tiene simetría circular y \vec{b} tiene solo un componente distinto de cero, b_z [línea azul sólida en la Figura 2]. En los alrededores de la cavidad, se rompe la simetría del flujo de corrientes parásitas y se produce un componente distinto de cero \vec{b} en el plano yz [línea roja discontinua en la Figura 2]. La asimetría del flujo de la corriente parásito se refleja en el otro lado de la cavidad, lo que da como resultado el signo opuesto de b_y . En el caso de una bobina de rf sobre la cavidad, debido a una mayor elevación, el flujo del campo magnético a través de la placa se vuelve más pequeño y, en consecuencia, $|\vec{b}|$ disminuye. Nos referiremos al valor máximo de b_y y b_z dentro de los límites de la cavidad como $b_{y,máx}$ y $b_{z,máx}$.

Como hemos demostrado anteriormente [15], en presencia de un campo primario fuerte \vec{B} a lo largo de z, los cambios en los componentes del campo secundario se asignan a la amplitud (b_z) y fase (b_y) de la señal de espectroscopia de rf. Los cambios en el campo magnético resultante monitoreado por el magnetómetro atómico son relativamente pequeños, ya que aparecen sobre un campo primario mucho más grande.

Para proporcionar una mejor visión, consideramos el caso donde $|\vec{b}| \sim \frac{1}{3} |\vec{B}|$ a lo largo de ambos z y \hat{y} . En este caso, los contrastes de amplitud y fase observados se estiman en $C_R \leq 0,05$ y $C_\varphi \leq 4^\circ$ respectivamente, donde $C_R = (R_{Máx} - R_{Mín}) / (R_{Máx} + R_{Mín})$ and $C_\varphi = \varphi_{Máx} - \varphi_{Mín}$, siendo $R_{Máx}$, $R_{Mín}$, $\varphi_{Máx}$, y $\varphi_{Mín}$ los valores máximos/mínimos de las variables relevantes (véanse los gráficos de esquina en la Figura 3 (c)). Estos valores son significativamente inferiores a su máximo de $C_R = 1$ y $C_\varphi = 180^\circ$.

La Figura 3 muestra la dependencia simulada de la amplitud y la fase de la señal de espectroscopia de rf medida por el magnetómetro atómico en el campo magnético resultante. Compensación completa del componente de campo

primario en el campo magnético resultante monitoreado por el magnetómetro atómico ($|\vec{B}'| \sim 0$) conduce a un aumento de la amplitud y el contraste de fase [$C_R = 0,44$ y $C_\varphi = 124^\circ$, gráfico central en la Figura 3] pero no produce

valores de contraste máximos. La razón es que para $|\vec{B}'| = 0$ la amplitud de la señal se convierte en $R = \sqrt{b_y^2 + b_z^2}$, donde el componente de alto contraste b_y se reduce por el desplazamiento que varía lentamente de b_z (Figura 2). La

fase de la señal de espectroscopia de rf ($\varphi = \arctan(\frac{b_y + B'_y}{b_z + B'_z})$) cambia 180° sólo cuando hay un cambio de signo en el nominador y una singularidad en el denominador. Esto indica que la condición para lograr el máximo contraste, con respecto a la \hat{z} componentes del eje, es cuando $B'_z + b_{z,máx} = 0$. En lo sucesivo, nos referiremos a esta condición, junto con $B'_y = 0$, como el punto de compensación. La Figura 3 confirma que la máxima amplitud y contraste de fase se observa para $B'_z + b_{z,máx} = 0$, en cada columna, es decir, para un valor arbitrario de B'_y .

Moverse hacia la derecha/izquierda desde el punto de compensación equivale a añadir un nivel de referencia negativo/positivo. Esto induce un cambio de simetría de los perfiles observados a ambos lados del punto de compensación. Los contrastes de amplitud y fase ($C_R = 1$, $C_\varphi = 180^\circ$) no se deterioran en los alrededores del punto de compensación siempre que $|B'_y| \leq b_{y,máx}$. En los alrededores del punto de compensación, el modelado predice saltos de fase en la señal de resonancia magnética de casi 180° sobre el área de la cavidad. La razón del cambio de fase repentino es la presencia de un componente z en el campo de rf resultante en el denominador de la función arctan que define la fase de la señal de espectroscopia de rf.

Los inventores adaptaron como banco de pruebas para la exploración experimental de la compensación del campo magnético de rf, los cambios en la amplitud y la fase de la señal de espectroscopia de rf registrada con una bobina de rf explorada a través de un defecto en forma de cavidad (24,5 mm de diámetro, 2,4 mm de profundidad) en una placa de aluminio y acero al carbono de 6 mm de espesor [15]. Partimos de la modalidad del punto de compensación. Experimentalmente, esto se logra ajustando la distancia entre las bobinas de compensación y la celda de vapor 20 (Figura 1(a)). La bobina ubicada encima de la celda de vapor 20 (la primera bobina de compensación 42) se posiciona en ejes con la bobina de rf 14 produciendo el campo primario. La ubicación óptima de esta bobina a lo largo de z se establece minimizando la amplitud de la señal de espectroscopia de rf.

La posición de la otra bobina de compensación (la segunda bobina de compensación 44) puede ajustarse en las tres direcciones. La presencia de esta bobina es particularmente importante en mediciones con objetos ferromagnéticos, donde la muestra produce un campo de rf significativo en el plano paralelo a la superficie de la muestra (el plano horizontal en este caso). La Figura 3 indica que la compensación en la dirección horizontal da como resultado perfiles de amplitud y fase simétricos. Este factor se usa en las búsquedas del punto de compensación.

La Figura 4 muestra los cambios en (a) amplitud, C_R (diamantes azules), y (b) fase, C_ϕ , contraste en función de la distancia de la bobina vertical desde el punto de compensación a lo largo de z. La medición se ha realizado con una placa de aluminio de 6 mm de espesor. Los cuadrados verdes en la Figura 4 (a) representan el cambio de la señal de espectroscopia de rf medida en el centro de la cavidad. Ambos gráficos confirman la presencia del máximo contraste en el punto de compensación. Como referencia, mostramos el valor de contraste de amplitud/fase registrado sin campos de compensación de rf [línea sólida azul/roja en la Figura 4 (a)/(b)].

La Figura 5 (a)-(c)/(g)-(i) muestra las imágenes de amplitud/fase de $64 \times 64 \text{ mm}^2$ área de una placa de acero al carbono de 6 mm de espesor que contiene una cavidad de 24,5 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad registrado para tres valores del componente horizontal del campo de rf de compensación. Las secciones transversales verticales a través del centro de las imágenes de amplitud/fase se muestran en la Figura 5 (d)-(f)/(j)-(l). Son equivalentes a los perfiles de amplitud calculados de la segunda fila de la Figura 3. Los casos ilustrados en la Figura 5 (b)/(e), (h)/(k) representan el punto de compensación. Cerca del punto de compensación, la imagen de amplitud producida por una cavidad es simétrica, es decir, hay dos máximos correspondientes a bordes ascendentes y descendentes.

Esto resulta de poner a cero el campo primario que establece la referencia de fondo para los cambios en el campo secundario generado por la magnetización ($R \sim |b_y|$). El máximo brillante en la Figura 5 (b) se rodea por un anillo oscuro, en otras palabras, los perfiles creados por los dos bordes de la cavidad no son perfectamente simétricos. Esto podría deberse a una compensación imperfecta del campo magnético estático, además de los campos de rf. Una compensación imperfecta del campo magnético estático, es decir, una variación del campo magnético ambiental, equivale a un cambio en la dirección del eje del magnetómetro atómico, lo que podría afectar a la imagen observada [véase la siguiente sección, Figura 7 (b) y (c)]. Esto podría minimizarse al aumentar la frecuencia de operación. La respuesta magnética de la muestra puede considerarse en términos de cambios en la inductancia de la bobina de rf. La falta de homogeneidad en la magnetización a través de la placa se consideraría una variación de la resistencia del campo primario, lo que significa que la compensación del campo de rf es válida solo a nivel local. El cambio en la resistencia del campo de rf monitoreado por el magnetómetro puede verse por la variación en el nivel de fondo. Se produce un cambio en la forma y simetría de los perfiles de amplitud a ambos lados del punto de compensación, relacionado con el paso de $R = |b_y + B'_y|$ [Figura 5 (d)] pasando por $R \sim |b_y|$ [Figura 5 (e)] hasta $R = |b_y - B'_y|$ [Figura 5 (f)]. El contraste de fase disminuye a medida que nos alejamos del punto de compensación, Figura 5 (g)-(i). Es importante destacar que el área donde la fase se aleja de su valor de fondo disminuye a medida que se aleja del punto de compensación. Esto podría tener consecuencias prácticas en una medición con una etapa espacial gruesa, ya que el cambio de fase generado por la cavidad podría no ser visible, ya que sería equivalente a la integración espacial del cambio de fase en un área más grande.

El beneficio de la compensación de rf puede demostrarse en el experimento con una distancia de despegue aumentada, 6 mm - 7 mm. El punto de partida para esto es una medición del contraste de fase en una configuración estándar (la bobina de rf que produce el campo primario se encuentra a 1 mm - 2 mm por encima de la superficie de la muestra, sin compensación de rf). El contraste de fase para un caso de una cavidad de 12 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad en una placa de aluminio de 6 mm de espesor es $C_\phi=40^\circ$. Un aumento de la elevación (6 mm - 7 mm) da como resultado una reducción de la resistencia del campo primario en la muestra y, en consecuencia, del campo secundario. Al mismo tiempo, para una distancia fija entre la celda de vapor y la muestra, Figura 1(a), el componente de campo primario monitoreado por el magnetómetro atómico aumenta. Esto provoca una reducción del contraste de fase registrado. $C_\phi=20^\circ$. Con los ajustes del campo de rf de compensación pudimos no solo recuperar el valor de contraste de fase inicial sino incluso aumentarlo hasta su valor máximo, $C_\phi=180^\circ$.

Aunque en la modalidad anterior, \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 anterior, esto significa que puede omitirse la segunda bobina de compensación 44.

Otra modalidad se muestra en la Figura 6. En la modalidad de la Figura 6, el efecto sobre el magnetómetro atómico de los componentes de los campos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra se reduce alineando un eje insensible del magnetómetro atómico con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra.

El método de esta modalidad se beneficia del hecho de que el magnetómetro atómico de rf no es sensible al campo magnético oscilante a lo largo de los ejes del campo de polarización estática, $\vec{B}_{\text{polarización}}$ (Figura 1(a)) [16]. Para el $\vec{B}_{\text{polarización}}$ orientada a lo largo de z, que preferentemente también es la B dirección, B_z estará ausente en la señal del

magnetómetro atómico de rf y la configuración de medición se vuelve equivalente a una con el componente de campo primario compensado.

El magnetómetro atómico evalúa la resistencia del campo magnético oscilante mediante la medición de la amplitud de coherencia Zeeman atómica producida por este campo en el vapor atómico polarizado a lo largo de la dirección del campo magnético estático, $\vec{B}_{polarización}$ [19]. Dado que sólo los campos magnéticos oscilantes ortogonalmente a la dirección $\vec{B}_{polarización}$ pueden generar coherencias atómicas, el magnetómetro es insensible a los campos de rf a lo largo de la dirección $\vec{B}_{polarización}$. Para el $\vec{B}_{polarización}$ Alineada a lo largo de z, esta propiedad del magnetómetro atómico es equivalente a la primera parte de la condición de compensación, $B'_z + b_z = 0$, en otras palabras, una ausencia del componente z del campo de rf resultante en la señal del magnetómetro.

La modalidad de la Figura 6 es en muchos aspectos la misma que la modalidad de la Figura 1(a), excepto lo discutido anteriormente. El campo magnético de polarización estática 26 se dirige a lo largo de z y se ajusta a la misma resistencia usada en las mediciones anteriores (equivalente a la frecuencia de Larmor de aproximadamente 12,6 kHz). El haz láser de bombeo 28 se alinea a lo largo del campo magnético de polarización 26. Las bobinas de Helmholtz se ajustan en consecuencia y se configuran para anular los campos estáticos a lo largo de las direcciones x e y.

Aunque no es necesario en todas las modalidades, en la modalidad de la Figura 6, el sistema también incluye un conjunto de bobinas de radiofrecuencia 40' para proporcionar un campo magnético compensatorio para compensar los componentes del campo primario que son paralelos a la superficie de la muestra (componentes horizontales del campo primario en este caso). La posición de estas bobinas de compensación se varía de manera que se minimiza la señal de espectroscopia de rf. Las bobinas de compensación 40' incluyen una primera bobina de compensación 46 y la segunda bobina de compensación 44, siendo la segunda bobina de compensación 44 como se explicó anteriormente. La primera bobina de compensación 46 tiene un eje sustancialmente paralelo a la superficie de la muestra y sustancialmente ortogonal a la dirección del campo de polarización y a la dirección del láser de sonda. En esta modalidad, el eje de la primera bobina de compensación 46 sustancialmente se alinea con la dirección x. La corriente a través de las bobinas de compensación 40' se ajusta para minimizar la señal de espectroscopia de rf sin muestra, en otras palabras para compensar los componentes horizontales del campo primario ($B'_x = 0$ y $B'_y = 0$). Como antes, el campo magnético resultante monitorizado por el magnetómetro atómico rf incluye componentes del campo primario, secundario y de compensación, en otras palabras $\vec{b} + \vec{B} + \vec{B}_c = \vec{b} + \vec{B}$.

En la modalidad de la Figura 6, la amplitud ($R = \sqrt{(b_x)^2 + (b_y)^2}$) y la fase ($\phi = \arctan(\frac{b_x}{b_y})$) de la señal de espectroscopia de rf reflejan variaciones de la amplitud y fase de los componentes horizontales del campo secundario.

En otras palabras, la modalidad de la Figura 6 tiene $\vec{B}_{polarización}$ a lo largo de z. Los haces láser de bombeo orientan el vapor atómico a lo largo de la dirección del campo de polarización. Los componentes horizontales del campo primario se compensan en la celda de vapor mediante un conjunto de dos bobinas de rf orientadas en la dirección x e y.

La Figura 7 ilustra los beneficios y las diferencias entre los dos esquemas de compensación discutidos. Muestra las imágenes de 64x64 mm² área de una placa de aluminio de 6 mm de espesor que contiene una cavidad de 24 mm de diámetro y 2,4 mm de profundidad registrado en tres configuraciones diferentes: (a) sin compensación, (b) con compensación realizada con dos bobinas de rf, y (c) con campo magnético de polarización girado y bobinas de compensación. Las imágenes representan el cambio de la amplitud de la señal de espectroscopia de rf. Como se mencionó anteriormente, para el caso no compensado (a) el perfil registrado muestra variación del componente vertical del campo secundario. En los casos compensados, las imágenes muestran el componente horizontal (b)/componentes (c) del campo secundario. La diferencia de simetría de la imagen resulta del cambio de dirección del campo de polarización. En el caso que se muestra en la Figura 7 (b) $\vec{B}_{polarización}$ se dirige a lo largo del eje x y, por lo tanto, solo las firmas producidas por los bordes de la cavidad paralelos a esa dirección están presentes en el perfil registrado (en otras palabras, el borde paralelo a $\vec{B}_{polarización}$ produce un campo secundario oscilante perpendicular a $\vec{B}_{polarización}$ que se podía ver con el magnetómetro). En el caso que se muestra en la Figura 7 (c) $\vec{B}_{polarización}$ se dirige a lo largo del eje z y el perfil registrado muestra todo el contorno de la cavidad. Hemos calculado el contraste de amplitud, C_R , como se definió anteriormente para las tres imágenes. Los números confirman [(a) $C_R = 0,04$; (b) $C_R = 0,77$; (c) $C_R = 0,79$] que la implementación de los esquemas de compensación permite una identificación más fácil de los defectos estructurales en las imágenes de amplitud. En el caso de la geometría modificada, la fase de la señal de espectroscopia de rf muestra un vórtice centrado en la cavidad.

Se muestran arriba dos métodos para mejorar el contraste en las imágenes que representan las variaciones de la amplitud y fase de la señal de espectroscopia de rf registrada por el magnetómetro atómico en la medición de NDT

por corrientes parásitas. Los métodos se basan en la compensación de los componentes del campo magnético de radiofrecuencia resultante monitoreado por el magnetómetro atómico implementado en los ejemplos anteriores, ya sea mediante un conjunto de bobinas o mediante la geometría de la medición. La reducción de la amplitud de la señal de rf monitoreada por el magnetómetro atómico a través del proceso de compensación no compromete la capacidad de detección de defectos. Por el contrario, la monitorización de la fase de la señal en configuración compensada proporciona la posibilidad de una señal clara (cambio de fase de 180°) de la falta de homogeneidad.

En otra modalidad para aumentar la amplitud y/o el contraste de fase de la salida del sistema, se modula el campo magnético de polarización. Esto puede hacerse además o en lugar de reducir el efecto sobre el magnetómetro de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a la muestra. En otros aspectos, la modalidad es sustancialmente como se describe para la primera o segunda modalidad.

La Figura 8 muestra un diagrama esquemático del sistema de las Figuras 1(a) y 6. El sistema funciona de la siguiente manera.

1. La salida de la referencia interna del amplificador de bloqueo (1) 36 genera una corriente modulada en frecuencia en la bobina de rf 14.
2. La bobina 14 produce un campo de rf (primario), que acciona la precesión de los espines atómicos en la celda de detección en el campo magnético de polarización ($B_{polarización}$).
3. La resistencia del campo magnético de polarización define el valor de la frecuencia resonante de Larmor ($\omega_L = \gamma B_{polarización}$), la frecuencia para la cual hay un acoplamiento máximo entre los espines atómicos y el campo de rf.
4. Para observar la precesión de los espines atómicos, se usa el haz de sonda polarizado linealmente fuera de resonancia 32. La dirección de polarización del haz se acopla a la oscilación de los espines atómicos a través del efecto Faraday. La oscilación de polarización se transfiere a la señal electrónica mediante el polarímetro balanceado 34. La amplitud y la fase de la oscilación se leen mediante el amplificador de bloqueo 36 (referenciado a la modulación de corriente de la bobina de rf).
5. Para ver el comportamiento resonante de la precesión de espines atómicos, podemos escanear la frecuencia del campo primario para un campo magnético de polarización dado (gráfico de la izquierda de la Figura 9) o escanear el campo magnético de polarización para la frecuencia del campo primario elegida (gráfico de la derecha de la Figura 9). La Figura 9 muestra cómo se verían los resultados en ambos ejemplos.
6. Cuando la muestra se coloca en los alrededores de la bobina de rf, los átomos experimentarán adicionalmente la influencia del campo secundario producido por la muestra.

Fase y amplitud de la señal

Cuando la muestra se mueve en los alrededores de la bobina de rf, la interferencia entre el campo primario y el secundario provoca un cambio en la amplitud y la dirección del campo de rf que impulsa los átomos. El cambio de amplitud de rf se transfiere al cambio de resistencia de la respuesta atómica, mientras que el cambio de dirección del campo de rf se transfiere al cambio de la fase de la oscilación del espín atómico.

Un solo píxel en el escaneo

En el esquema de medición más simple y rápido, podríamos establecer la frecuencia del campo de rf en resonancia y medir la amplitud y la fase de la señal atómica mientras se mueve la muestra. Los inventores lo han hecho con aluminio, que no es magnético, pero las muestras de acero son ferromagnéticas y se magnetizan fuertemente. Esto provoca cambios en el campo magnético de polarización e incluso con la compensación de campo activa como se describió anteriormente, el cambio es típicamente mayor que el ancho de línea de la resonancia. El desplazamiento es una consecuencia de la distancia distinta de cero entre la sonda magnética usada para la compensación del campo y la celda atómica.

Una forma de eliminar este problema se muestra en la Figura 11; sin embargo, esto implica una medición lenta (tiempo: 10 s por píxel). Este método es como sigue:

- 1) La frecuencia del campo de rf se escanea escaneando la frecuencia de modulación de la corriente de la bobina de rf 14.
- 2) La señal se demodula mediante el bloqueo 1 y se registran los cambios en la fase y el componente de cuadratura de la señal.
- 3) El ordenador ajusta los datos y a partir del ajuste se extraen la amplitud y la fase de la señal.

Sin embargo, en una modalidad de la invención, una forma mejorada de eliminar este problema se muestra esquemáticamente en la Figura 12, que proporciona una medición rápida (< 1 s por píxel).

Como se describió anteriormente, en la mayoría de las mediciones, la frecuencia del campo primario se escanea a través de la resonancia de rf, es decir, se registra todo el perfil de resonancia para cada punto de la imagen [15]. Los

inventores han desarrollado otro modo de adquisición de datos, que permite una reducción significativa del tiempo de adquisición de imágenes. En este modo, la modulación de la frecuencia \vec{B} se sustituye por la modulación de baja frecuencia (1-20 Hz en este ejemplo) de la amplitud del componente $\vec{B}_{polarización}$. En este caso, la señal demodulada en la frecuencia de campo primario por el amplificador de bloqueo 36 (SRS 865 en esta modalidad) contiene una oscilación de baja frecuencia con una amplitud igual a la de la amplitud de resonancia de rf. El uso de un segundo amplificador de bloqueo referenciado a la frecuencia de la modulación de amplitud $\vec{B}_{polarización}$ permite la lectura de la amplitud de resonancia de rf. La amplitud de la modulación de frecuencia \vec{B} puede balancear una imperfección en las estabilizaciones $\vec{B}_{polarización}$, como un posible desplazamiento de la frecuencia de resonancia para diferentes ubicaciones de la muestra. Como consecuencia de ello, la fase de la señal grabada contiene información sobre el cambio del campo secundario así como el desplazamiento de frecuencia del perfil de rf.

En esta modalidad, el sistema incluye el segundo amplificador de bloqueo 38.

La fuente del campo magnético de polarización 24 incluye un modulador para modular el campo magnético de polarización y para emitir una señal de modulación al segundo amplificador de bloqueo 38. La primera salida del primer amplificador de bloqueo (referenciado a la frecuencia de la bobina de rf) se conecta a la entrada del segundo amplificador de bloqueo (referenciado a la modulación del campo de polarización). El segundo amplificador de bloqueo se configura para demodular la señal de salida del primer amplificador de bloqueo 36 con referencia a la modulación del campo magnético de polarización y para proporcionar una amplitud y fase de la señal. El segundo amplificador de bloqueo 38 sirve como demodulador.

El método es como sigue:

- 1) La frecuencia del campo de rf se mantiene constante, pero el valor del campo magnético de polarización se modula lentamente. En esta modalidad, la frecuencia de modulación del campo de polarización es de 1 a 10 Hz (la frecuencia de precesión es de alrededor de 12 kHz). Sin embargo, es preferible que la frecuencia de la modulación del campo de polarización sea lo más alta posible. Esta modulación del campo de polarización se realiza preferentemente en forma de una onda de diente de sierra que periódicamente aumenta o disminuye el campo de polarización.
- 2) En este caso observamos una señal modulada en amplitud.
- 3) Medimos la amplitud de estas oscilaciones con el primer bloqueo (demodulamos con referencia a la frecuencia del campo primario).
- 4) La medición de la amplitud de la modulación lenta se realiza con el segundo bloqueo referenciado a la señal de modulación del campo magnético de polarización. La amplitud medida por Bloqueo 2 corresponde a la amplitud de la resonancia atómica.

Las modalidades, por ejemplo como cualquiera de los sistemas descritos anteriormente, pueden realizar imágenes con una sensibilidad de 0,1 mm.

Las modalidades pueden usarse para obtener imágenes de estructuras de acero de forma no destructiva en presencia de barreras conductoras ocultas a temperatura ambiente, en entornos sin protección magnética, con compensación activa de los campos de fondo y compensación de la magnetización de las muestras. Esto puede usarse, por ejemplo, para la detección de corrosión en tuberías ocultas (CUI) y la detección de anomalías estructurales en estructuras de hormigón. Las modalidades de la invención pueden usarse para detectar la corrosión bajo el aislamiento. Las modalidades de la invención pueden proporcionar un mayor contraste para permitir la obtención de imágenes de picaduras de corrosión de tamaño submilimétrico, por ejemplo en tuberías.

En algunas modalidades, los sistemas descritos anteriormente pueden implementarse en un robot para escanear áreas grandes, por ejemplo de tuberías.

En algunas modalidades, el método y/o sistema puede usarse para detectar el estado de estructuras de hormigón.

Las aplicaciones pueden ser la fabricación y la construcción, donde la calidad de los ensamblajes y las soldaduras es importante, y a menudo requiere el uso de escáneres de rayos X potencialmente peligrosos y caros; la fabricación de materiales como parte de un proceso de fabricación; los sistemas de control de la salud y el uso (HUMS), donde la identificación oportuna y no invasiva de los daños estructurales y la fatiga es un objetivo primario; la energía nuclear; y en el sector de los servicios públicos y/o la energía, por ejemplo el petróleo y el gas, donde los vertidos tienen costes económicos así como también medioambientales. Las aplicaciones también incluyen la detección de corrosión bajo el aislamiento para el sector energético, la monitorización de estructuras de hormigón armado para el sector del transporte y la monitorización de buques de desechos nucleares.

Las ventajas particulares son que el sistema y el método pueden:

- Ser seguro y no invasivo (por ejemplo, radiaciones no ionizantes)

- Detectar corrosión en la pared interior de una tubería.
- Detectar corrosión en la pared exterior de una tubería.
- Ser capaz de diferenciar entre corrosión y cambios en las geometrías de las tuberías debido a curvaturas, uniones en T y soldaduras en la tubería.
- Poder escanear todos los tipos de aislamiento.
- Ser de bajo costo.
- Proporcionar mejoras a las técnicas de corriente (resolución, cambiar modos de escaneo).

Aunque en las modalidades anteriores se describe un amplificador de bloqueo 36 que proporciona el controlador de campo primario, el controlador de campo primario puede incluir cualquier generador de corriente siempre y cuando el controlador de oscilación de campo primario incluya un procesador para demodular la señal de salida del polarímetro balanceado con referencia a la frecuencia o modulación del generador de corriente. Sin embargo, un amplificador de bloqueo es ventajoso porque hace más fácil la detección de los espectros, ya que la fuente de frecuencia/modulación y el detector están dentro de un instrumento (la sincronización y la referencia se resuelven automáticamente).

Aunque en las modalidades anteriores, la detección de respuesta del material se usa para obtener imágenes de defectos del material, esto no es necesario en todas las modalidades. En algunas modalidades, la detección de la respuesta del material puede usarse para otros fines, por ejemplo, para detectar la conductividad y/o permeabilidad del material.

Todas las características y modificaciones opcionales y preferidas de las modalidades descritas y las reivindicaciones dependientes se usan 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.

Puede encontrar más detalles en "Enhanced material defect imaging with a radio-frequency atomic magnetometer" J. Appl. Phys. 125, 094503 (2019); doi: 10.1063/1.5083039, una versión de la cual se adjuntó como Anexo 2 a las solicitudes de patente del Reino Unido números GB1811928.9 y GB1813858.6 del cual se reclama prioridad.

Referencias

- [1] L. Ma y M. Soleimani, Meas. Sci. Technol., 28, 072001 (2017).
- [2] H. Griffiths, Meas. Sci. Technol., 12, 1126 (2017).
- [3] B. A. Auld and J. C. Moulder, J. Nondestr. Eval. 18, 3 (1999).
- [4] L. Perez, J. Le Hir, C. Dolabdjian y L. Butin, J. Elec. Eng., 55, 73 (2004).
- [5] A. Sophian, G. Tian, M. Fan, Chin. J. Mech. Eng., 30, 500 (2017).
- [6] T. Dogaru and S. T. Smith, Nondestr. Prueba. Eval., 16, 31 (2000).
- [7] T. Dogaru and S. T. Smith, IEEE Transactions on Magnetism, 37, 5, 3831 (2001).
- [8] P. Ripka, M. Janosek, IEEE Sensors J. 10, 1108 (2010).
- [9] H. J. Krause and M. V. Kreutzbruck, Physica C, 368, 70 (2002).
- [10] J. Storm, P. Hömmen, D. Drung, R. Körber, App. Phys. Lett. 110 072603 (2017).
- [11] A. Wickenbrock, S. Jurgilas, A. Dow, L. Marmugi, and F. Renzoni, Opt. Lett. 39, 6367 (2014).
- [12] C. Deans, L. Marmugi, S. Hussain, and F. Renzoni, Appl. Phys. Lett. 108, 103503 (2016).
- [13] A. Wickenbrock, N. Leefer, J. W. Blanchard, and D. Budker, Appl. Phys. Lett. 108, 183507 (2016).
- [14] C. Deans, L. Marmugi, and F. Renzoni, Opt. Exp. 25, 17911 (2017).
- [15] P. Bevington, R. Gartman, W. Chalupczak, C. Deans, L. Marmugi, and F. Renzoni submitted to App. Phys. Lett.
- [16] Orientation of the GMR sensitive axis parallel to the surface of the sample has been discussed in [7].
- [17] W. Chalupczak, RM Godun, S. Pustelny y W. Gawlik, Appl. Phys. Lett. 100, 242401 (2012).
- [18] G. Bevilacqua, V. Biancalana, P. Chesssa, Y. Dancheva, App. Phys. B 122 103 (2016).
- [19] W. Chalupczak, R. M. Godun, S. Pustelny, Advances in At. Mol. and Opt. Phys. 67, 297 (2018).

REIVINDICACIONES

1. Un método para detectar la respuesta de un material, que incluye:

- 5 proporcionar un campo magnético primario oscilante para hacer que una muestra (16) produzca un campo magnético secundario;
reducir el efecto sobre un magnetómetro atómico (12) de los componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a una superficie de la muestra (16);
10 detectar el campo magnético secundario con el magnetómetro atómico (12) para detectar la respuesta del material;
en donde la reducción del efecto sobre un magnetómetro atómico (12) de componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente ortogonal a una superficie de una muestra incluye:
- 15 proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluye un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16); y/o
alinear un eje insensible del magnetómetro atómico con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16).
- 20 2. El método de la reivindicación 1, en donde el campo magnético primario es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16).
3. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde la reducción del efecto sobre un magnetómetro atómico (12) de componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente
25 ortogonal a una superficie de una muestra incluye:
proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluya un componente sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16).
4. El método de la reivindicación 3, en donde el campo magnético compensatorio se proporciona de manera que
30 $Bz' + bz = 0$, en donde Bz' es un componente de \vec{B}' que es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16), bz es un componente del campo magnético secundario que es sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16), $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$, \vec{B} es el campo magnético primario, y \vec{B}_c es el campo magnético compensatorio.
5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 3 a 4, en donde el campo magnético compensatorio incluye un componente en una primera dirección sustancialmente paralela a la superficie de la muestra (16), y de manera preferente sustancialmente ortogonal a un eje insensible del magnetómetro atómico (12), para reducir el efecto de los componentes del campo magnético primario en la primera dirección; opcionalmente en donde $By' = 0$, By'
40 es un componente de \vec{B}' en la primera dirección, $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$, \vec{B} es el campo magnético primario, y \vec{B}_c es el campo magnético compensatorio.
6. El método de cualquier reivindicación anterior, en donde la reducción del efecto sobre un magnetómetro atómico (12) de componentes de los campos magnéticos primario y secundario en una dirección sustancialmente
45 ortogonal a una superficie de una muestra incluye:
alinear un eje insensible del magnetómetro atómico con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16).
7. El método de la reivindicación 6, en donde el magnetómetro atómico (12) incluye un campo magnético de polarización, incluyendo el método la alineación del campo magnético de polarización con una dirección sustancialmente ortogonal a la superficie de la muestra (16).
8. El método de la reivindicación 6 o 7, que incluye proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluye un componente en una primera dirección sustancialmente paralela a la superficie de la muestra (16), reduciendo el campo magnético compensatorio el efecto de los componentes del campo magnético primario en la primera dirección.
- 55 9. El método de la reivindicación 8, en donde $By' = 0$, en donde By' es un componente de \vec{B}' en la primera dirección, $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$, \vec{B} es el campo magnético primario, y \vec{B}_c es el campo magnético compensatorio.
- 60 10. El método de la reivindicación 8 o 9, en donde el campo magnético compensatorio incluye un componente en una segunda dirección sustancialmente paralela a la superficie de la muestra (16), siendo la segunda dirección sustancialmente ortogonal a la primera dirección, reduciendo el campo magnético compensatorio el efecto de los componentes del campo magnético primario en la segunda dirección; opcionalmente en donde $Bx' = 0$, siendo
- 65

Bx' un componente de \vec{B}' en la segunda dirección, $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_c$, \vec{B} es el campo magnético primario, y \vec{B}_c es el campo magnético compensatorio.

11. Un sistema para detectar la respuesta de un material, que incluye:

una fuente del campo magnético (14) para proporcionar un campo magnético primario oscilante para hacer que una muestra (16) produzca un campo magnético secundario;
un magnetómetro atómico (12) para detectar el campo magnético secundario para detectar la respuesta del material;
caracterizado porque el sistema 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;
en donde:

el sistema incluye una fuente del campo magnético compensatorio (40) para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluye un componente en la dirección primaria; y/o
el magnetómetro atómico (12) tiene un eje insensible dispuesto en la dirección primaria.

12. El sistema de la reivindicación 11, en donde el sistema incluye una fuente del campo magnético compensatorio (40) para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluye un componente en la dirección primaria, en donde opcionalmente la fuente del campo magnético compensatorio incluye una disposición de bobina.

13. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 11 a 12, en donde el magnetómetro atómico (12) tiene un eje insensible dispuesto en la dirección primaria.

14. El sistema de acuerdo con la reivindicación 13, en donde el magnetómetro atómico (12) incluye una fuente del campo magnético de polarización configurada para proporcionar un campo magnético de polarización en la dirección primaria.

15. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, que incluye una fuente del campo magnético compensatorio (40) para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico (12) que incluye un componente en una primera dirección sustancialmente ortogonal a la dirección primaria para reducir el efecto de los componentes del campo magnético primario en la primera dirección; opcionalmente en donde la fuente del campo magnético compensatorio es para proporcionar un campo magnético compensatorio en el magnetómetro atómico que incluye un componente en una segunda dirección sustancialmente ortogonal a la dirección primaria para reducir el efecto de los componentes del campo magnético primario en la segunda dirección, siendo la segunda dirección sustancialmente ortogonal a la primera dirección.

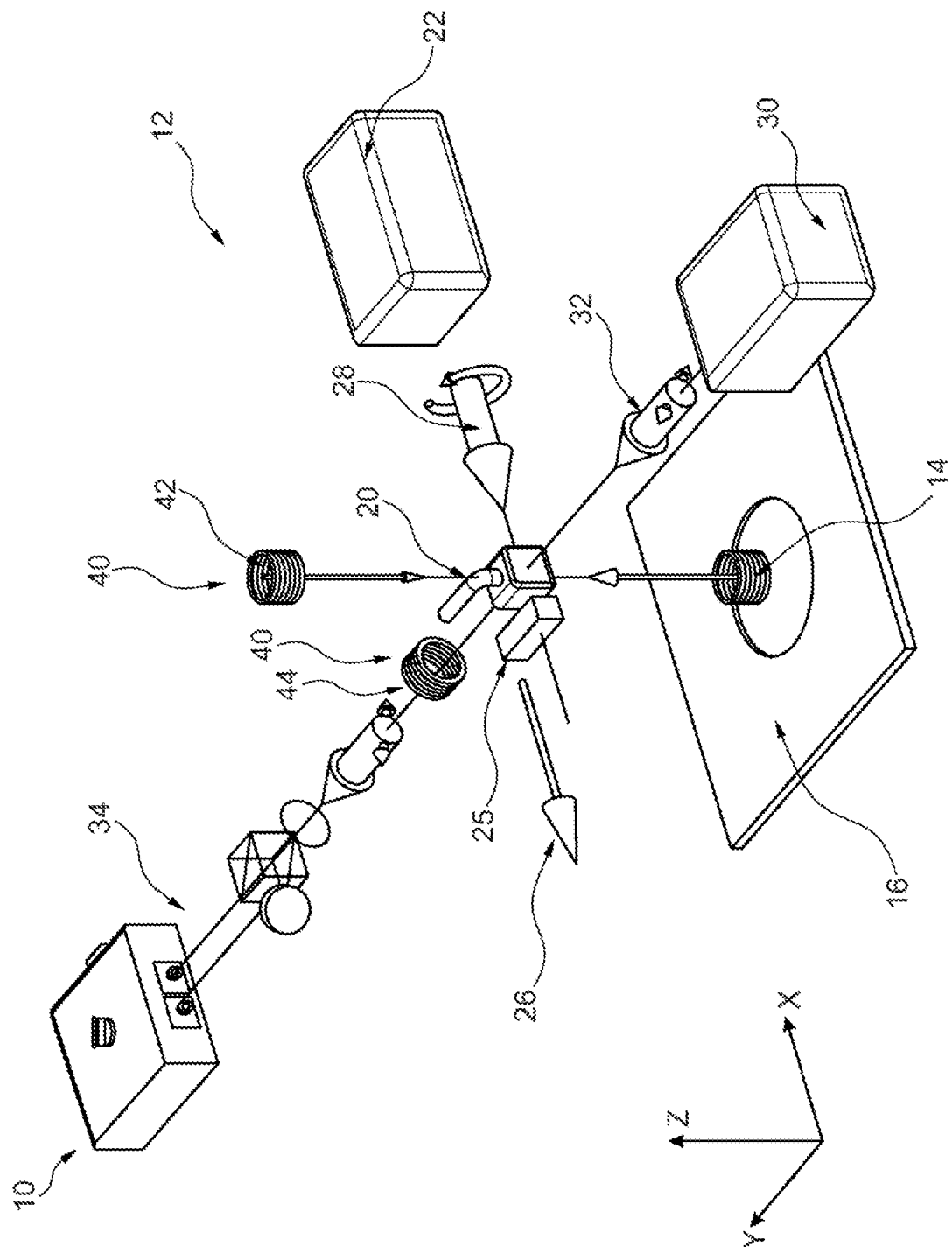


Figura 1 (a)

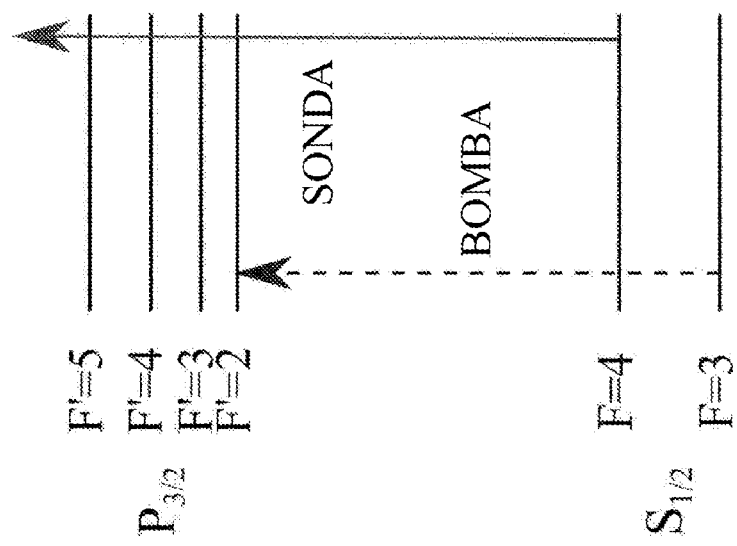


Figura 1 (b)

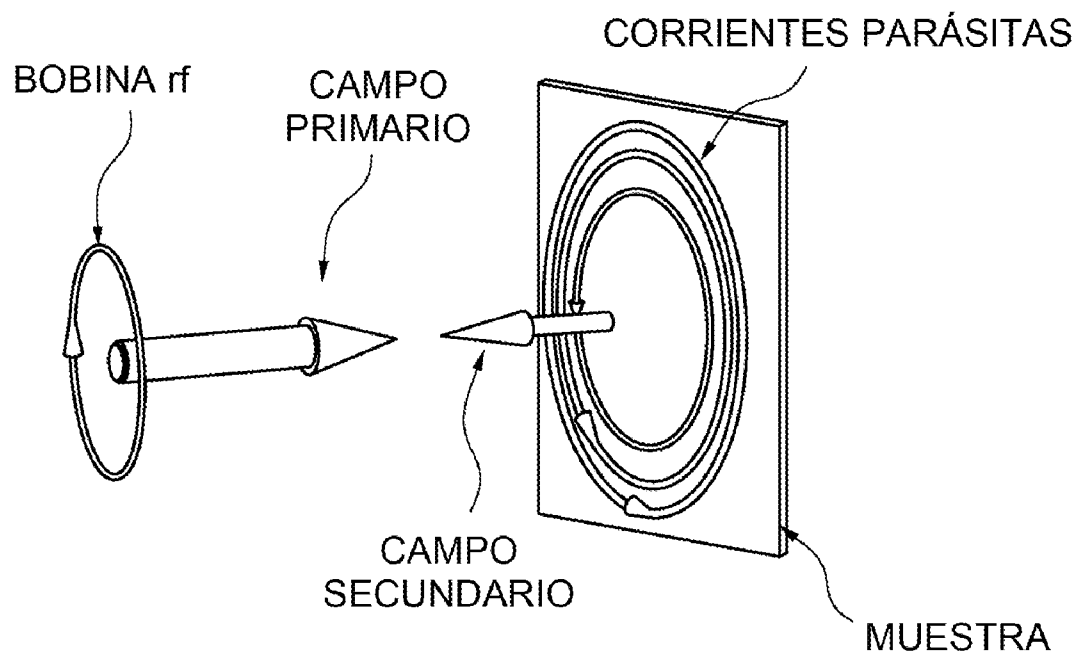


Figura 1 (c)

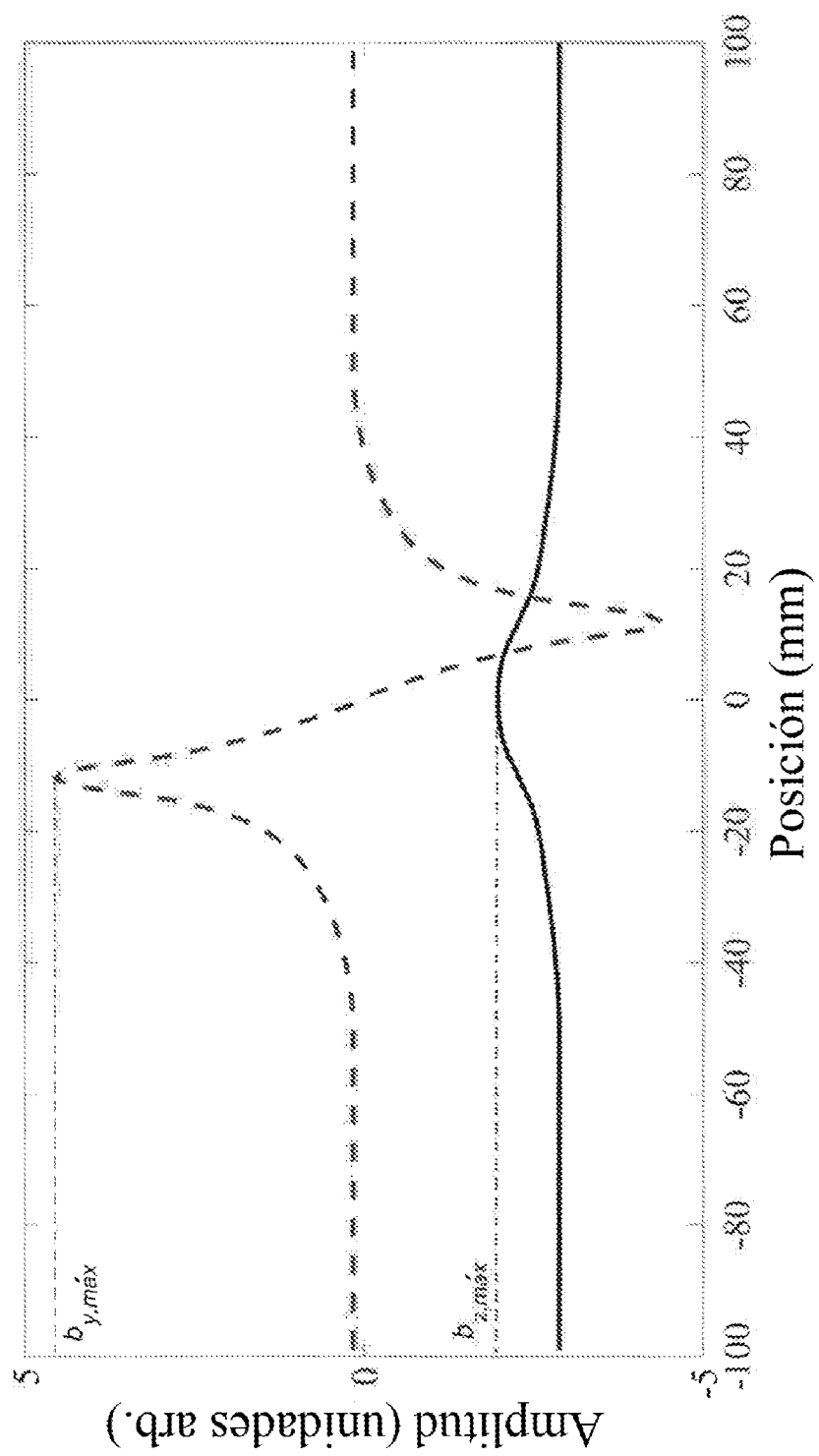


Figura 2

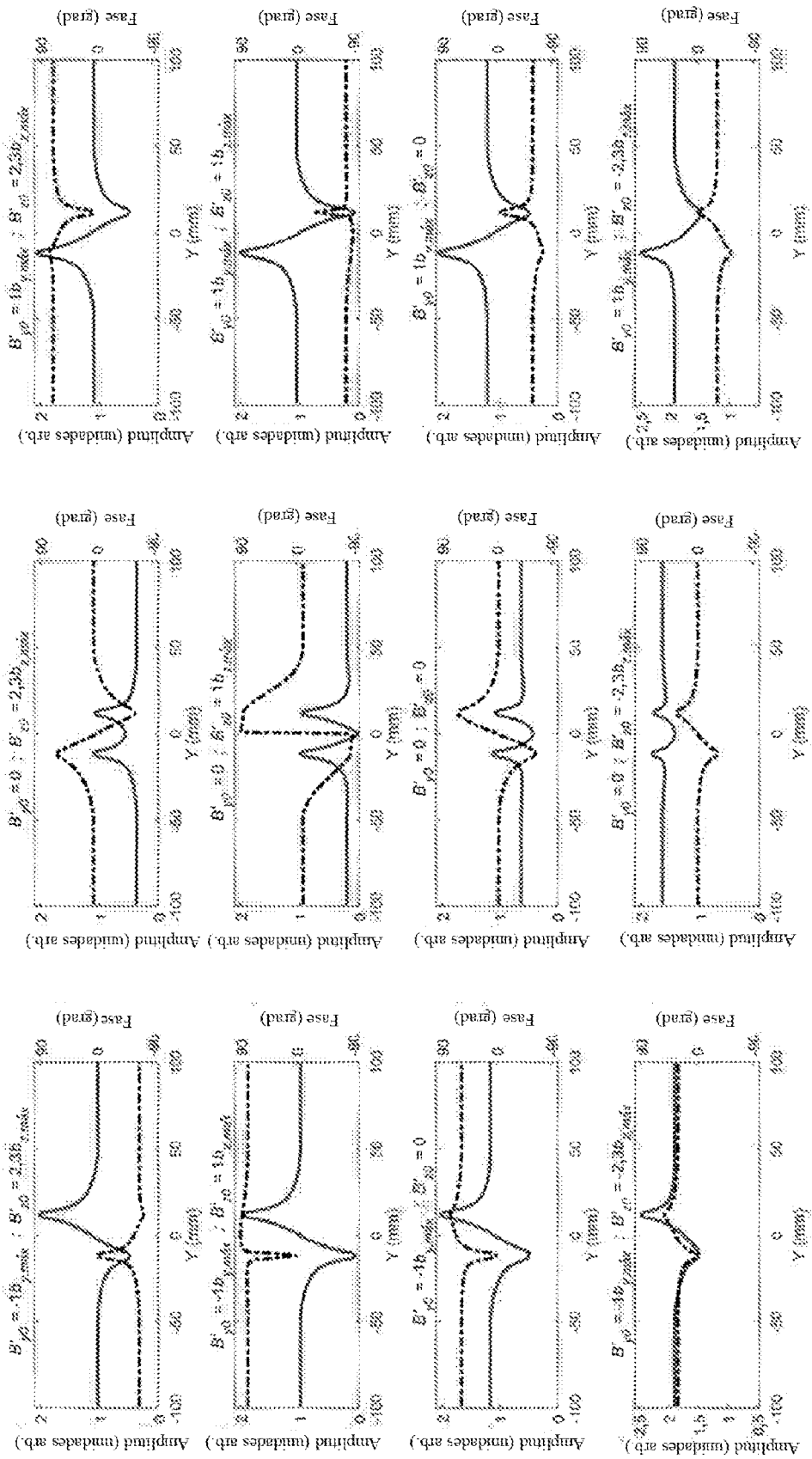


Figura 3

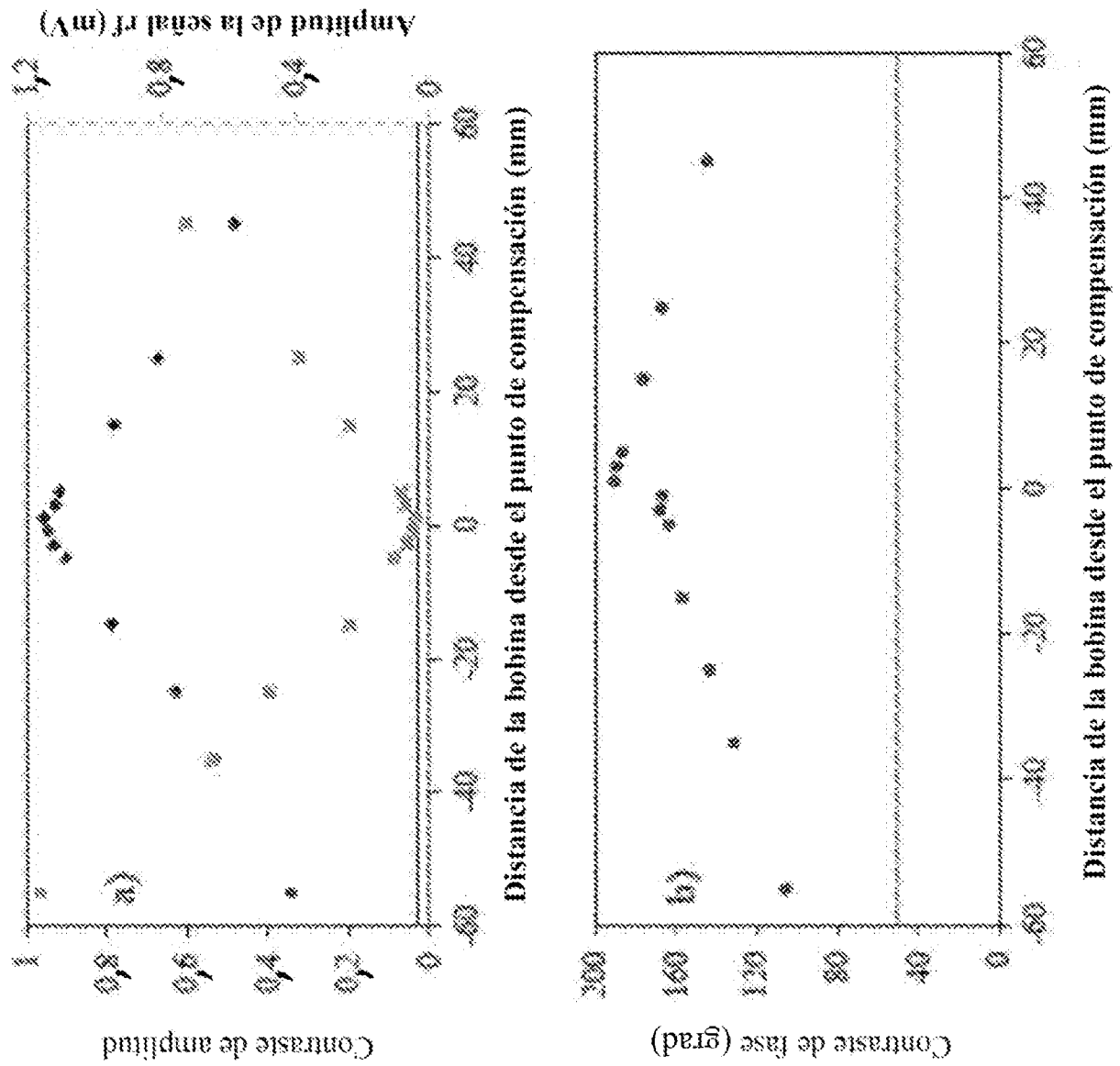


Figura 4

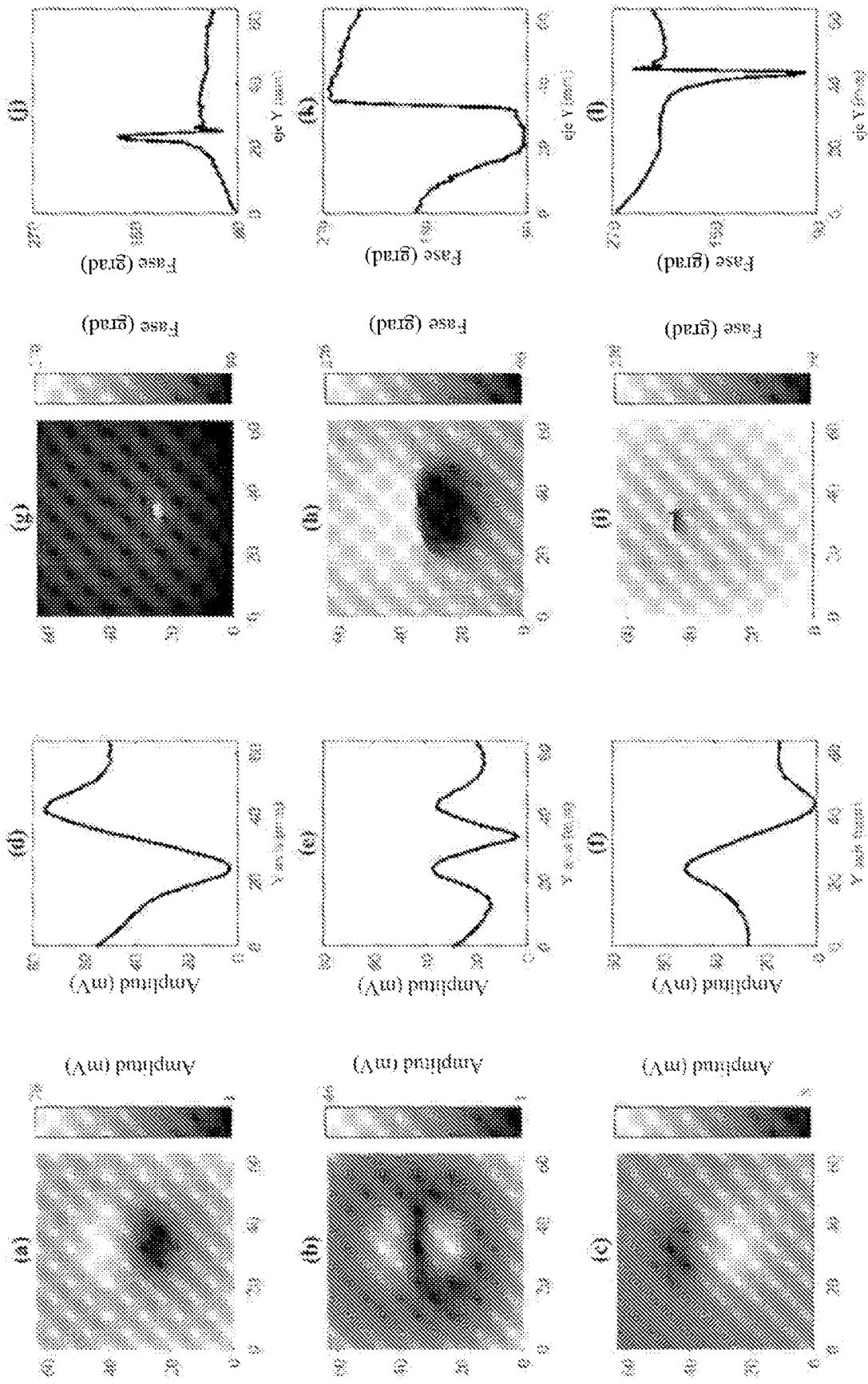


Figure 5

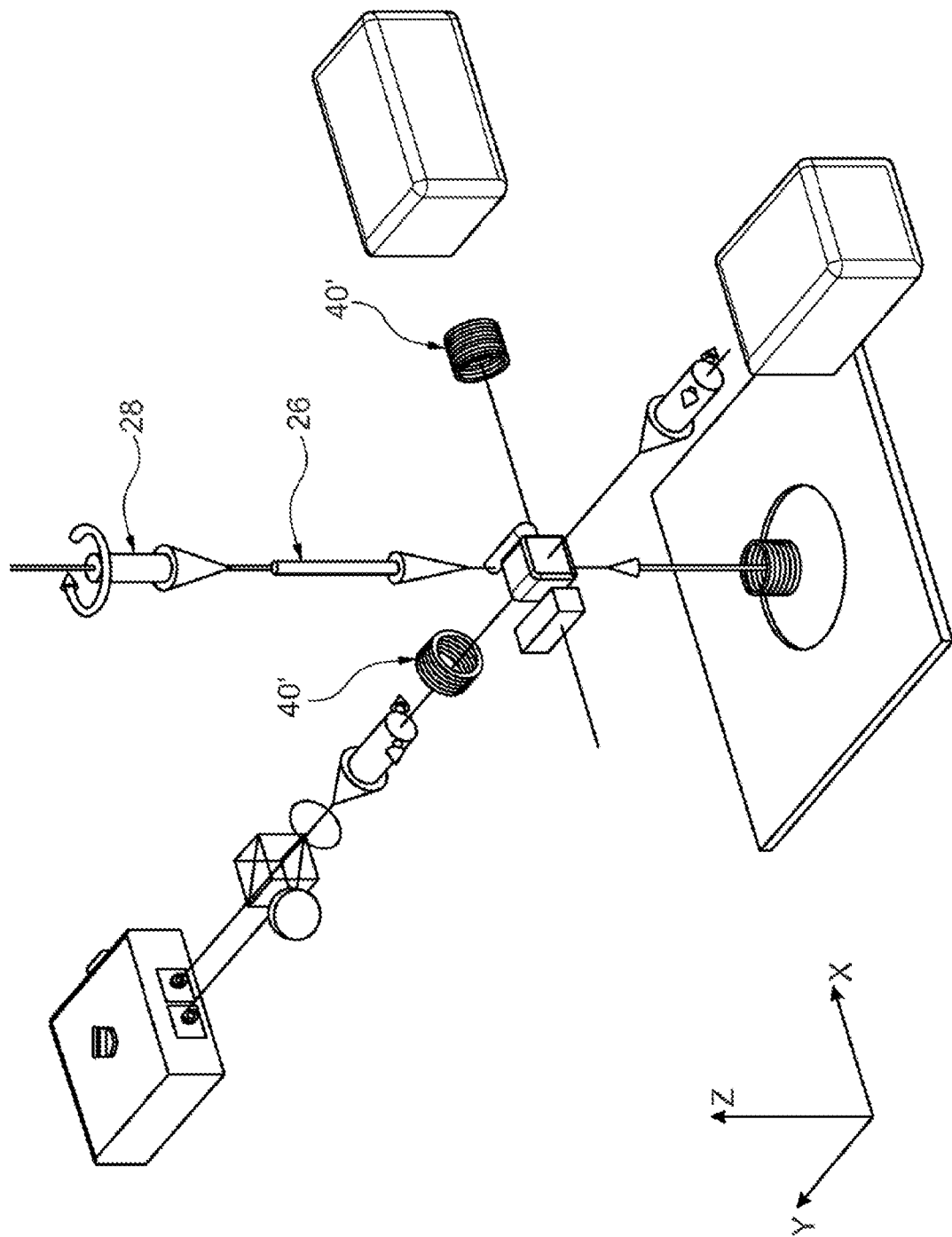


Figura 6

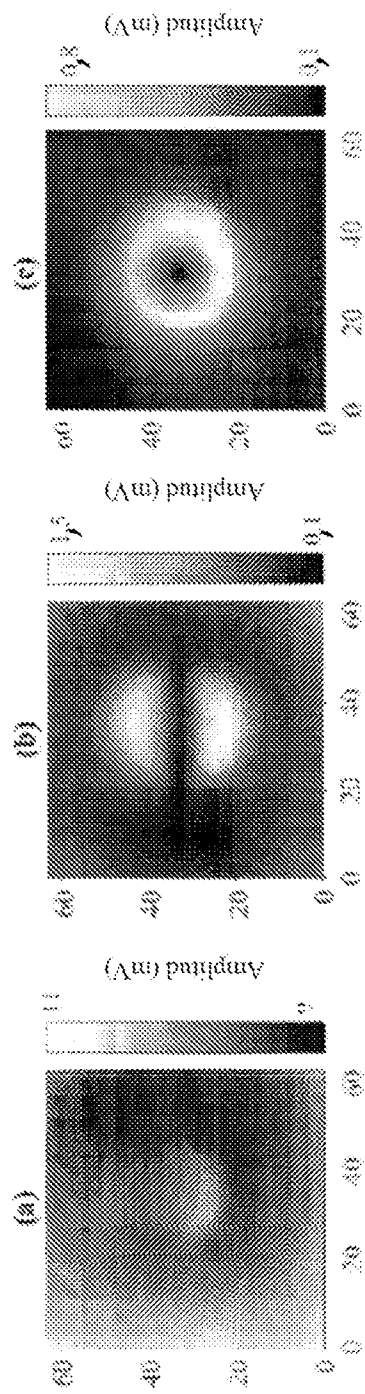


Figura 7

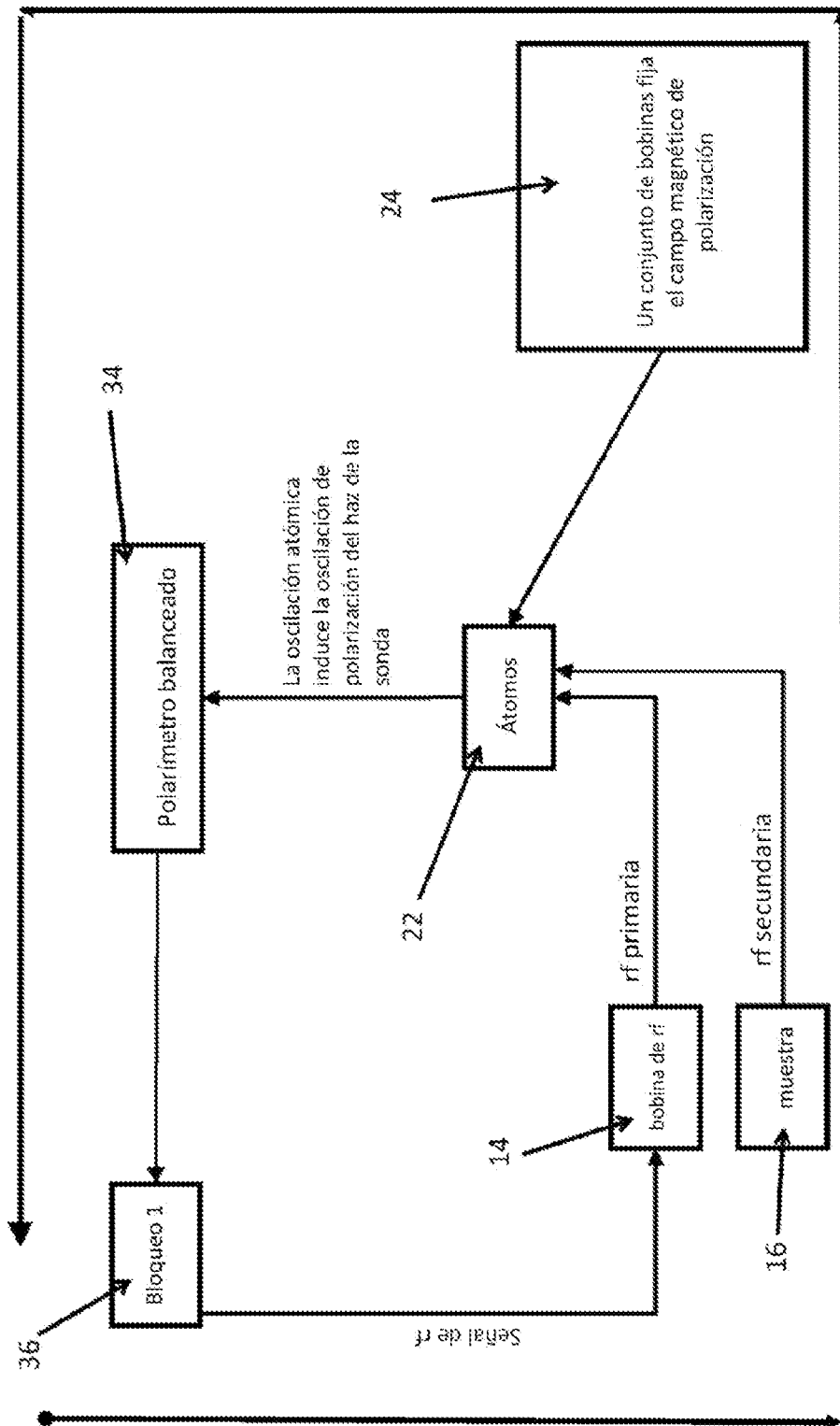


Figura 8

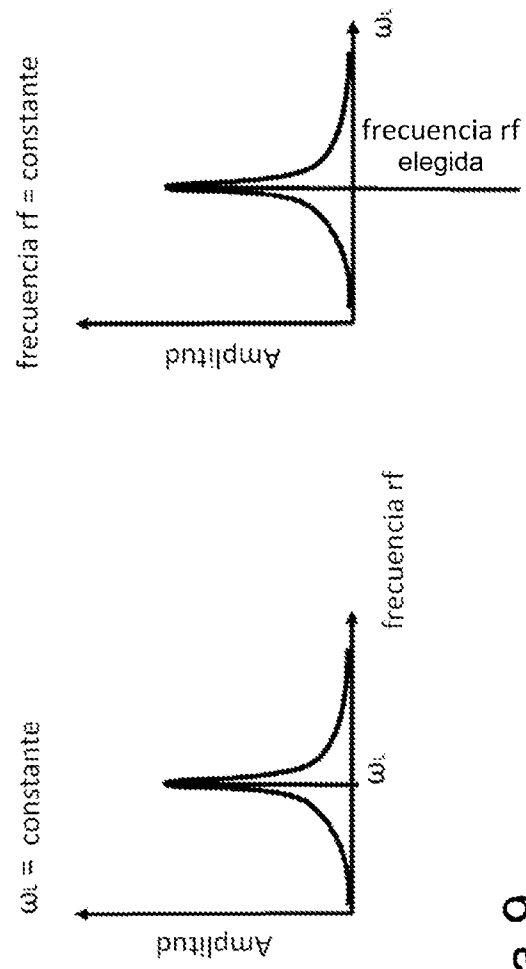


Figura 9

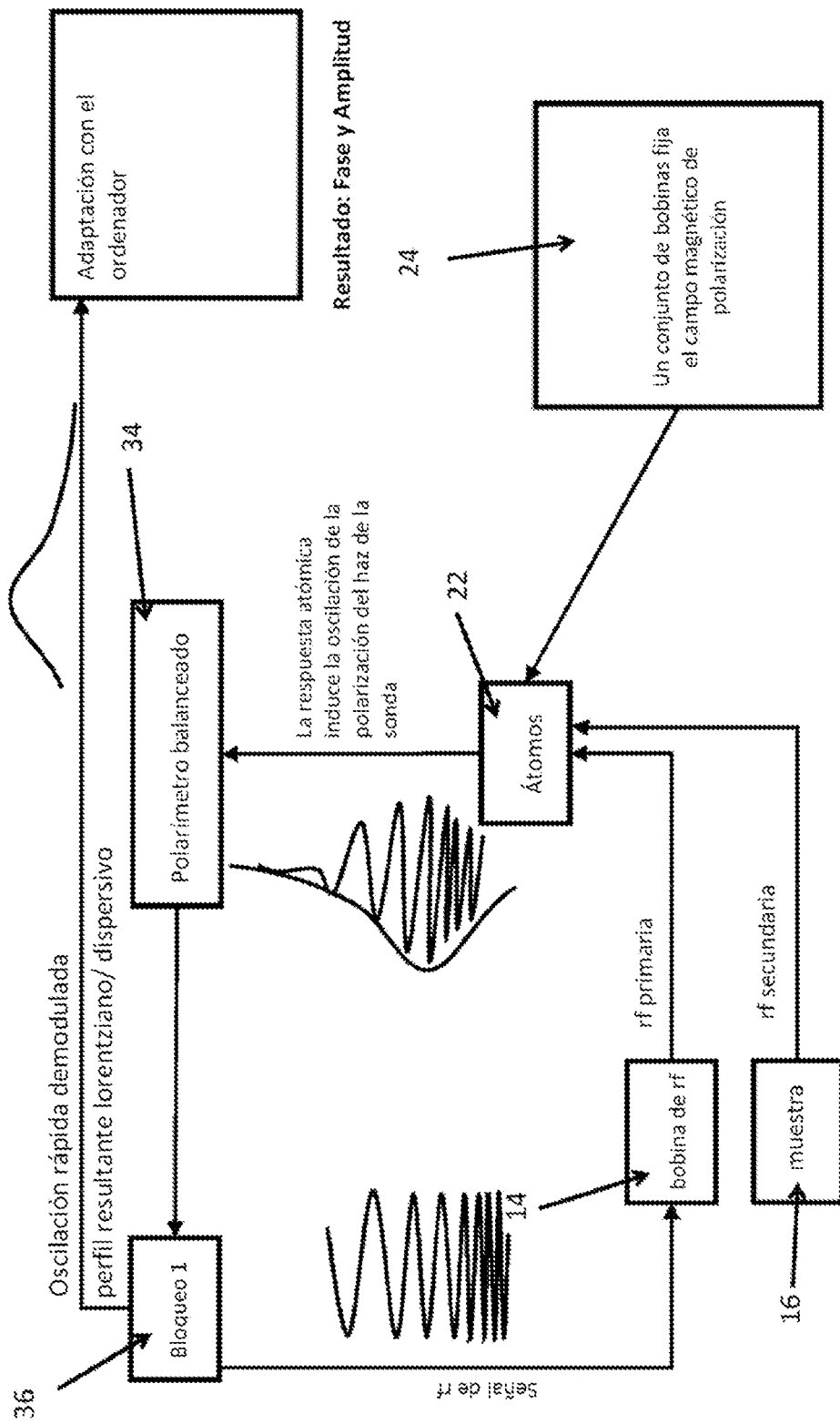


Figura 11

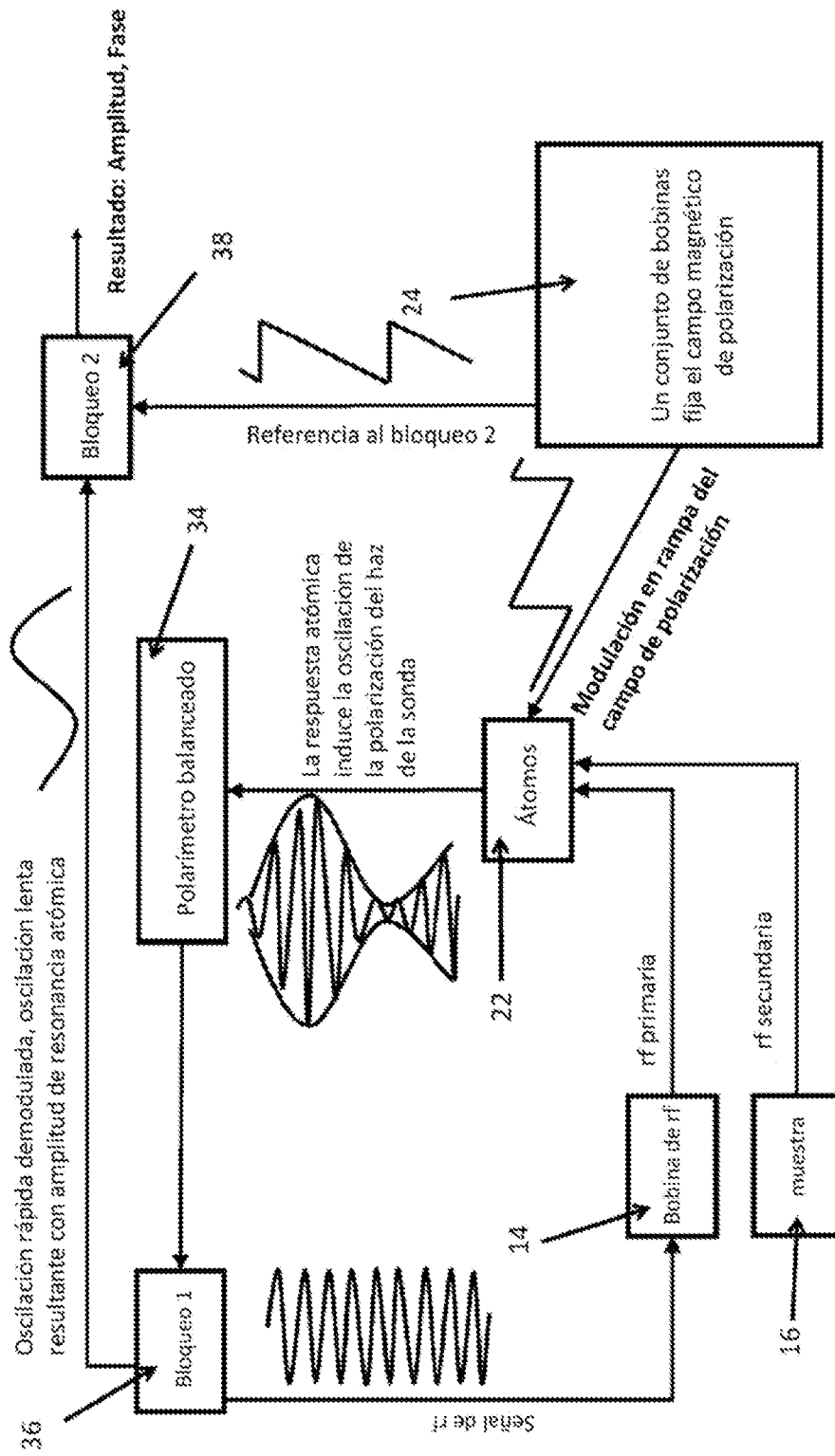


Figura 12