

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
Registro de la Propiedad Industrial



ESPAÑA

19 ES	11 NUMERO	10 A1
	21 466.056	
	22 FECHA DE PRESENTACION	
	17-1-78	

Concedida en virtud del acuerdo
del Consejo de Regencia de la Propiedad Industrial y según el contenido de la Memoria adjunta.

PATENTE DE INVENCION

30 PRIORIDADES: 31 NUMERO /	32 FECHA	33 PAIS
--------------------------------	----------	---------

47 FECHA DE PUBLICIDAD	51 CLASIFICACION INTERNACIONAL G21K	62 PATENTE DE LA QUE ES DIVISIONARIA
------------------------	--	--------------------------------------

64 TITULO DE LA INVENCION "DISPOSITIVO DE CREACION Y DETECCION DE RESONANCIA MAGNETICA NUCLEAR"
--

71 SOLICITANTE (S) LITTON SYSTEMS, INC.	Docket No. GCD-75-14A
--	--------------------------

DOMICILIO DEL SOLICITANTE 360 North Crescent Drive, Beverly Hills, California 90210, Estados Unidos de América
--

72 INVENTOR (ES) Bruce C. Grover, Edward Kanegsberg, John G. Mark y Roger L. Meyer

73 TITULAR (ES)

74 REPRESENTANTE D. FERNANDO DE ELZABURU MARQUEZ (P.- 67.881)
--

1 FUNDAMENTOS DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a la creación y detección de resonancia magnética nuclear. Más en particular, la presente invención se refiere a la aplicación de resonancia magnética nuclear a un giroscopio.

5 En la técnica anterior se ha sugerido un cierto número de enfoques para llevar a la práctica el concepto básico de un giroscopio RMN de resonancia magnética nuclear. En general, utilizan un oscilador controlado por re-
10 sonancia magnética nuclear, y derivan información rotacional de las fases de señales de precesión Larmor de momento nuclear, mediante comparación de fases y circuitería de control de campo magnético adecuadas.

En general, estos dispositivos contienen deficiencias significativas que limitan el desarrollo de un instrumento útil. Por ejemplo, tales dispositivos han estado limitados por los relativamente cortos tiempos de relajación de los gases que se han empleado. Además, el fuerte acoplamiento directo entre estos gases y la luz que se emplea como medio de alineación de momento magnético o detección de momento magnético puede limitar tanto los tiempos de relajación como la relación señal a ruido, y por tanto también puede limitar la utilidad potencial de tales instrumentos.

25 RESUMEN DE LA INVENCION

Se expone un giroscopio de resonancia magnética nuclear (denominada en lo sucesivo "RMN") que funciona según el principio de detectar la velocidad de rotación angular por inercia o el desplazamiento angular alrededor de un eje sensible del dispositivo, como desplazamiento en la fre-

1 frecuencia o fase, respectivamente, de la precesión Larmor de
uno o más isótopos que poseen momentos magnéticos nuclea-
res. El giroscopio está compuesto por un detector o percep-
tor de rotación angular y los elementos electrónicos aso-
5 ciados. Los elementos principales del detector son una fuente
de luz, una célula de RMN, un fotodetector, un conjunto
de pantallas magnéticas y un conjunto de arrollamientos de
campo magnético. Los principales elementos electrónicos
son circuitos de tratamiento de señal, para extraer la in-
10 formación sobre frecuencia y fase de precesión Larmor, así
como circuitos para generar y controlar diversos campos
magnéticos, tanto estacionarios como variables sinusoidal-
mente con el tiempo, que son necesarios para el funciona-
miento apropiado del dispositivo.

15 La célula de RMN está montada dentro de un con-
junto de pantallas magnéticas, para atenuar los campos mag-
néticos exteriores hasta niveles aceptablemente bajos. Se
usan arrollamientos de campo magnético para aplicar campos
magnéticos muy uniformes a la célula de RMN. Se aplican
20 tanto un campo continuo como un campo portador de CA a lo
largo del eje sensible del dispositivo, y se aplican cam-
pos de retroalimentación a lo largo de uno de los ejes
transversales. Los campos magnéticos de CC a lo largo de
ambos ejes transversales se controlan para que sean vir-
25 tualmente cero. La célula de RMN contiene un vapor de me-
tal alcalino, tal como rubidio, junto con dos isótopos de
uno o más gases nobles, tal como cripton-83 y xenon-129.
También puede estar contenido en la célula un gas amorti-
guador; tal como helio.

30

La célula de RMN es iluminada por un rayo de luz

1 polarizada circularmente que se origina en una fuente tal
como una lámpara de rubidio, y que atraviesa la célula for-
mando ángulo con respecto al campo magnético estacionario.
La absorción de algo de esta luz hace que los momentos mag-
5 néticos atómicos de los átomos de rubidio queden parcial-
mente alineados en la dirección del campo magnético esta-
cionario. Esta alineación se transfiere parcialmente a
los momentos magnéticos nucleares de los gases nobles, y
se hace que estos momentos realicen una precesión alrede-
10 dor de la dirección del campo magnético estacionario, lo
que a su vez crea campos magnéticos que giran a las respec-
tivas frecuencias de precesión Larmor de los dos gases no-
bles. Estos campos rotativos modulan los movimientos de
precesión de los momentos magnéticos del rubidio, lo que
15 a su vez produce las correspondientes modulaciones de la
luz transmitida, haciendo así posible detectar ópticamen-
te las frecuencias de precesión Larmor de los dos gases
nobles.

Las modulaciones de la intensidad de la luz se
20 convierten en señales eléctricas por un fotodetector, y
estas señales se desmodulan luego electrónicamente y se
filtran, para proporcionar señales a las frecuencias de
precesión Larmor de los dos gases nobles. La diferencia en-
tre las dos frecuencias de precesión se usa para controlar
25 con exactitud el campo magnético estacionario, de manera
que sea constante. Una de las frecuencias de precesión del
gas noble se compara con una frecuencia de referencia de
precisión, y la diferencia de frecuencia resultante es la
velocidad de rotación angular del giroscopio.

30 Las dos señales de precesión de gas noble detec-

1 tadas se usan también para generar dos campos magnéticos
de retroalimentación de CA, a las frecuencias de precesión
Larmor de los gases nobles, y estas son responsables de
mantener la precesión de los momentos magnéticos nuclea-
5 res de los gases nobles. El uso de un campo magnético por-
tador de CA facilita la detección óptica de los momentos
del gas noble en precesión, y a la vez proporciona unos
medios para controlar los campos magnéticos de CC a lo lar-
go de los dos ejes transversales del giroscopio.

10 Según la invención, en el giroscopio de RMN se
incluyen medios para alineación simultánea de los momen-
tos magnéticos nucleares de al menos dos gases de momento
nuclear, constituyendo así un dispositivo de alineación
de momentos magnéticos nucleares; medios para conseguir
15 una precesión mantenida de estos momentos, constituyendo
así un oscilador de resonancia magnética nuclear capaz
de oscilaciones mantenidas; medios para detección óptica
de estos momentos nucleares en precesión, constituyendo
así un dispositivo de detección de resonancia magnética
20 nuclear; medios para controlar con exactitud el campo mag-
nético interior del dispositivo; y medios para medida exac-
ta de la frecuencia o fase de la señal de precesión de mo-
mento nuclear detectada, de al menos uno de los gases de
momento nuclear, para proporcionar una medida de la velo-
25 cidad de rotación angular o desplazamiento angular, respec-
tivamente, del dispositivo respecto al espacio inerte,
constituyendo así un giroscopio de RMN.

30 Más en particular, se aplica un campo magnético
estacionario a una célula de RMN que está sustancialmente
protegida de otros campos magnéticos estacionarios. La cé-

1 lula de RMN conticne un gas o vapor de una sustancia que
posee un momento magnético que se puede alinear por bom-
beo óptico, junto con uno o más gases adicionales, cada
uno de los cuales posee un momento magnético nuclear. La
5 célula de RMN se ilumina por una luz de bombeo óptico que
tiene un componente direccional que es paralelo a la direc-
ción del campo magnético estacionario, y que tiene la lon-
gitud de onda apropiada para ser absorbida por la sustan-
cia susceptible de bombeo óptico y alinear parcialmente
10 los momentos magnéticos de esa sustancia. Se hace que los
momentos nucleares de los gases de momento nuclear queden
alineados, y se hace que estén sujetos a precesión, a sus
respectivas frecuencias de precesión Larmor, alrededor de
la dirección del campo magnético estacionario. También se
15 aplica a la célula de RMN un campo magnético de CA a una
frecuencia portadora adecuada, y se ilumina la célula por
una luz de detección que tiene un componente direccional
que es ortogonal respecto a la dirección del campo magné-
tico portador de CA, y que tiene una longitud de onda que
20 es esencialmente la misma que la de la luz de bombeo ópti-
co. La intensidad de aquella parte de la luz de detección
que es transmitida por la célula se modula según la tota-
lidad de los campos magnéticos presentes en la célula, in-
cluyendo los campos magnéticos que son generados por los
25 momentos magnéticos nucleares en precesión. Estas modula-
ciones de la intensidad de la luz transmitida son detec-
tadas por un fotodetector, tras lo cual son desmoduladas
electrónicamente, para obtener señales a las frecuencias
de precesión Larmor de los gases de momento nuclear.

30 En una realización, la alineación de los momen-

1 - tos magnéticos nucleares de cada gas de momento nuclear
se consigue por interacciones de colisión entre los átomos
de la sustancia susceptible de bombeo óptico y los átomos
del gas o gases de momento nuclear. La precesión manteni-
5 da de los momentos magnéticos nucleares de cada gas de mo-
mento nuclear se consigue por aplicación de un campo mag-
nético de retroalimentación de CA, a la frecuencia de pre-
cesión Larmor del gas de momento nuclear, en una dirección
que es ortogonal respecto a la dirección del campo magné-
10 tico estacionario. El campo magnético portador de CA se
aplica a sustancialmente la frecuencia de precesión Lar-
mor de la sustancia susceptible de bombeo óptico, y en una
dirección que es sustancialmente paralela a la dirección
del campo magnético estacionario, permitiendo así que el
15 dispositivo funcione a valores más altos de la intensidad
del campo magnético estacionario, y con frecuencias de pre-
cesión Larmor correspondientemente mayores, para los ga-
ses de momento nuclear.

20 En la realización preferida, una sustancia sus-
ceptible de bombeo óptico, tal como un vapor de metal al-
calino, se pone en una célula de RMN junto con dos gases
nobles, y los momentos magnéticos nucleares de ambos ga-
ses nobles se alinean simultáneamente por interacciones
de colisión entre los átomos de los átomos de metal alca-
25 lino y los átomos de los dos gases nobles. En esta reali-
zación preferida de la invención, el metal alcalino es
rubidio y los gases nobles son cripton-83 y xenon-129.

Otra característica de la invención implica el
uso de al menos un gas amortiguador, en cantidades sustan-
30 ciales, en la célula de RMN.

1 Según aún otra característica de la invención,
se hace que la magnitud del campo magnético continuo per-
manezca constante por control de retroalimentación del cam-
po, de tal manera que se haga que la diferencia entre las
5 frecuencias de precesión Larmor de los dos gases nobles
en la célula de RMN sea igual a un valor constante prede-
terminado.

10 Según todavía otra característica de la inven-
ción, una de las frecuencias de precesión Larmor se compa-
ra con una frecuencia de referencia de precisión, y la di-
ferencia de frecuencia resultante se utiliza para propor-
cionar una medida del desplazamiento angular o velocidad
angular del dispositivo, alrededor de la dirección del cam-
po magnético estacionario.

15 Estas y otras características de la invención se
aclararán por referencia a las secciones tituladas "Prin-
cipios de la invención" y "Descripción detallada de la
realización preferida".

20 Es objeto de la presente invención proporcionar
un giroscopio de RMN que utiliza gases de momento nuclear
que tienen tiempos de relajación largos.

25 Otro objeto de la presente invención es propor-
cionar una técnica para obtener alineación de momentos mag-
néticos nucleares y resonancia magnética nuclear en estos
gases.

Aún otro objeto de la presente invención es pro-
porcionar una técnica para detectar las frecuencias de pre-
cesión Larmor de estos gases.

30 Aún otro objeto de la presente invención es pro-
porcionar una técnica para detectar y controlar el ambien-

1 te de campo magnético interior del giroscopio.

PRINCIPIOS DE LA INVENCION

5 Un giroscopio de RMN trabaja según el principio de detectar una velocidad de rotación angular como desplazamiento de la frecuencia de precesión Larmor de una o más especies nucleares que poseen momentos magnéticos nucleares.

10 Muchos isótopos atómicos (usualmente aquellos con número de masa atómica impar) poseen un momento angular (espín) inherente asociado con el núcleo. Coexistiendo siempre con tal momento angular nuclear, hay un momento magnético paralelo a él. La relación entre el momento magnético nuclear y el momento angular nuclear es una constante, γ , llamada relación giromagnética, que tiene un valor concreto para cada tipo de isótopo.

15 Si se pone un momento magnético nuclear en un campo magnético, con cualquier orientación distinta de la paralela a la dirección del campo, el momento magnético estará entonces sujeto a precesión alrededor de la dirección del campo, con una frecuencia angular, ω_L , llamada frecuencia de precesión Larmor, que es igual a:

$$\omega_L = \gamma H \quad (1)$$

20 donde γ es la relación giromagnética y H es la intensidad del campo magnético. Por tanto, cada isótopo tiene una frecuencia de precesión Larmor característica, en un campo magnético dado.

25 Si un sistema que contiene átomos que tienen colectivamente un momento magnético en precesión está, a su vez, girando a una velocidad angular ω_r , alrededor de la dirección de H, la frecuencia de precesión observada esta-

1 rá desplazada en cantidad igual a la velocidad de rotación,
de manera que la frecuencia de precesión Larmor observada
resultará:

$$\omega = \gamma H - \omega_r \quad (2)$$

5 Así, una medida de la frecuencia Larmor observada, ω , se
puede usar como medida de esa velocidad de rotación, si se
conocen tanto γ como H.

10 Si las frecuencias de precesión Larmor de dos
isótopos, cada uno de los cuales tiene un valor diferente
de γ , se miden en el mismo campo magnético, la velocidad
de rotación se puede medir entonces sin conocimiento di-
recto del valor del campo magnético. Las ecuaciones para
los dos isótopos son:

$$\omega_a = \gamma_a H - \omega_r \quad (3)$$

15

$$\omega_b = \gamma_b H - \omega_r$$

donde ω_a y ω_b son las frecuencias Larmor observadas
de los dos isótopos que tienen relaciones giromagnéticas
20 γ_a y γ_b , respectivamente. La resolución de esas ecua-
ciones para H o ω_r da las siguientes expresiones:

$$H = (\omega_a - \omega_b) / (\gamma_a - \gamma_b) \quad (4)$$

que es independiente de la velocidad de rotación angular,
 ω_r , y

25

$$\omega_r = \frac{\gamma_b \omega_a - \gamma_a \omega_b}{\gamma_a - \gamma_b} \quad (5)$$

que es independiente de la intensidad del campo magnético,
H.

30 En una de las realizaciones de la presente inven-
ción se hace que la intensidad del campo magnético sea

1 constante controlando el campo de tal manera que la dife-
 5 rencia de frecuencias, $\omega_a - \omega_b$, entre las dos frecuen-
 cias de precesión Larmor observadas, sea siempre igual a
 una constante. Específicamente, se eligen dos frecuencias
 de referencia de precisión, ω'_a y ω'_b , que se derivan
 de una fuente de frecuencia común, muy estable, de tal
 manera que ω'_a sea aproximadamente igual a $\gamma_a H$ y ω'_b
 sea aproximadamente igual a $\gamma_b H$, y su relación satisfa-
 ga con exactitud la siguiente relación:

$$10 \quad \omega'_a / \omega'_b = \gamma_a / \gamma_b \quad (6)$$

La intensidad del campo magnético se somete luego a servo-
 control, de tal manera que se haga que la diferencia de
 frecuencia medida entre las dos frecuencias de precesión
 15 Larmor observadas sea siempre igual a la diferencia de
 frecuencia entre las dos frecuencias de referencia de pre-
 cisión, concretamente:

$$\omega_a - \omega_b = \omega'_a - \omega'_b \quad (7)$$

Como consecuencia de la imposición de las dos condiciones
 20 definidas por las ecuaciones (6) y (7), se desprende que
 la intensidad del campo magnético es igual a:

$$H = \frac{\omega'_a - \omega'_b}{\gamma_a - \gamma_b} = \frac{\omega'_a}{\gamma_a} = \frac{\omega'_b}{\gamma_b} \quad (8)$$

25 que es una constante, y que la velocidad de rotación an-
 gular es igual a:

$$\omega_r = \omega'_a - \omega_a = \omega'_b - \omega_b \quad (9)$$

30 y por tanto se puede obtener fácilmente midiendo la dife-

1 rencia entre una u otra cualesquiera de las frecuencias
de precesión Larmor observadas y su frecuencia de referen-
cia de precisión asociada.

5 Además del fenómeno básico de la precesión del
momento magnético, y de la base matemática para la mecani-
zación del tratamiento de la señal, que permite medir la
información sobre velocidad de rotación angular, como se
ha descrito antes, hay otros varios fenómenos físicos im-
plicados en la realización de un giroscopio de resonancia
10 magnética nuclear práctico. Los que se describirán son la
alineación de momentos magnéticos nucleares, la consecución
de una precesión mantenida de estos momentos, y la
detección óptica de los momentos en precesión, para propor-
cionar una señal de la que se puede determinar la frecuen-
cia de precesión Larmor.

15 La magnitud de un momento magnético nuclear in-
dividual es extremadamente pequeña, y el estado de equili-
brio natural es uno en el que existe una orientación casi
al azar de momentos en un conjunto de átomos. Se han de
20 usar técnicas para orientar una fracción significativa de
estos momentos magnéticos en una dirección única, de mane-
ra que se producirá un momento magnético macroscópico, y
en consecuencia una señal medible.

25 La técnica que se usa para alinear momentos mag-
néticos nucleares, como se realiza en la presente inven-
ción, es un procedimiento en dos etapas, y se denominará
"bombeo". Los dos gases de momento magnético nuclear, que
son gases nobles en la realización preferida de la presen-
te invención, se combinan con un vapor de metal alcalino
30 en una célula única, ópticamente transparente. Esta célula

1 es iluminada por un rayo de luz de espectro filtrado, po-
larizada circularmente, que es emitido por una lámpara de
descarga eléctrica de vapor de metal alcalino. Se aplica
5 un campo magnético estacionario en tal dirección que un
componente significativo de este campo sea paralelo a la
dirección de la luz que es incidente sobre la célula.

La primera etapa de bombeo es un procedimiento
de bombeo óptico en el que los átomos de vapor de metal al-
calino son bombeados ópticamente por absorción de algo de
10 la luz incidente. Esto da como resultado la alineación de
una fracción significativa de los momentos magnéticos ató-
micos de los átomos alcalinos, en una dirección que es pa-
ralela a la del campo magnético estacionario aplicado.

La segunda etapa de bombeo es un procedimiento
15 de bombeo de intercambio de espín, donde algo de la alineación
de los momentos magnéticos atómicos de los átomos al-
calinos se transfiere a los momentos magnéticos nucleares
de los átomos de gas noble, por interacciones de intercam-
bio de espín durante colisiones entre los átomos alcalinos
20 y los átomos de gas noble. Esto da como resultado la ali-
neación de una fracción significativa de los momentos mag-
néticos nucleares de los átomos de gas noble, en una direc-
ción que es paralela a la del campo magnético estacionario.
Esta técnica de bombeo con intercambio de espín es una ex-
25 tensión de las técnicas de Bouchiat, Carver y Varnum (Phys.
Review Letters 5, página 373 (1960)). En particular, tal
como se realiza en la presente invención, se ha extendido
para incluir la alineación simultánea de los momentos mag-
néticos nucleares de dos isótopos de gas noble diferentes
30 contenidos en la misma célula.

1 Los momentos magnéticos alineados del sistema
alcalino y de ambos sistemas de átomos de gas noble están
sujetos a mecanismos de relajación que hacen que sus ali-
5 neaciones decaigan exponencialmente con el tiempo, hacia
su estado de equilibrio natural de orientación al azar.
Cada sistema de momentos está caracterizado por una cons-
tante de tiempo de relajación que depende de las clases y
cantidades de todos los demás constituyentes y del ambien-
te total en la célula de RMN. La alineación fraccionada
10 en estado estacionario de cada sistema de momentos es fun-
ción de tanto la velocidad de bombeo como del tiempo de
relajación para ese sistema, consiguiéndose alineaciones
fraccionadas mayores, y por tanto mayores amplitudes de
señal, cuando los tiempos de relajación son también largos.
15 Por tanto, para conseguir los tiempos de relajación más
largos posibles, también está contenida en la célula una
cantidad adecuada de un gas amortiguador, tal como helio
o nitrógeno, para reducir los efectos de relajación debidos
a interacciones de los momentos magnéticos con las paredes
20 de la célula. Además, se han elegido isótopos concretos
de gases nobles concretos, como gases de momento magnéti-
co nuclear, específicamente debido a sus largos tiempos de
relajación.

25 La precesión de los dos sistemas de momentos mag-
néticos de gas noble se inicia y mantiene aplicando dos
campos magnéticos de CA en una dirección que es ortogonal
respecto a la del campo magnético estacionario aplicado.
Estos campos tienen frecuencias que son iguales a las res-
pectivas frecuencias de precesión Larmor de los dos gases
nobles, y se denominan campos magnéticos de retroalimenta-

30

16018

1 ción de CA, ya que proporcionan la función de señal de
retroalimentación que es necesaria en cualquier oscilador
para conseguir unas oscilaciones mantenidas. Estos campos
de retroalimentación hacen que cada sistema individual de
5. momentos magnéticos de gas noble esté coherentemente sometido a un par de fuerzas que le separa de la dirección de su alineación inicial, que es paralela a la del campo magnético estacionario, hacia un plano que es ortogonal respecto a la dirección del campo magnético estacionario. Los
10 momentos magnéticos de cada sistema están continuamente sometidos a precesión en este plano, creando así dos momentos magnéticos macroscópicos en todo el volumen de la célula de RMN, y por tanto dos campos magnéticos, que giran en este plano a las respectivas frecuencias de precesión
15 Larmor de los dos gases nobles. La física asociada con la sumisión a un par de fuerzas de cuerpos en giro requiere que las fases de los campos de retroalimentación aplicados estén en cuadratura con las respectivas fases de los momentos magnéticos nucleares en precesión.

20 Estos momentos magnéticos nucleares en precesión se detectan ópticamente usando un camino que está adaptado de una técnica de magnetómetro que fue desarrollada por primera vez en Francia por C. Cohen Tannoudji, J. Dupont-Roc, S. Haroche y F. Lalöe (Rev. de Phys. Appl. 5, 95
25 (1970)). Esta técnica de magnetómetro trabaja sobre el principio de que el grado de absorción de luz de bombeo óptico por los átomos alcalinos en la célula de RMN depende de la orientación direccional de los momentos magnéticos de los átomos alcalinos individuales respecto a la dirección de la luz incidente. Ambos de los dos campos magné-

30

1 ticos en rotación, que son creados por los dos sistemas
 de momentos magnéticos nucleares de gas noble en precesión,
 ejercen individual y simultáneamente unos pares sobre los
 momentos magnéticos alcalinos en precesión, comunicando
 5 así movimientos de nutación a los momentos alcalinos en
 precesión, lo que, a su vez, modula la intensidad de la
 luz transmitida. La descripción matemática y característi-
 cas sobresalientes de este procedimiento de detección ópti-
 ca se pueden resumir muy brevemente como sigue:

10 Tal como se realiza en la presente invención,
 se aplica a la célula un campo magnético de CA sinusoidal
 $H_1 \cos \omega_c t$, que se denominará campo magnético portador,
 y se usa la dirección de este campo magnético portador pa-
 ra definir el eje z. También se aplica a la célula un cam-
 15 po magnético estacionario, esencialmente en la dirección
 del eje z. Los componentes de todos los campos magnéticos,
 excluyendo el campo magnético portador, se indican como
 H_x , H_y y H_z . La luz de bombeo óptico es incidente sobre la
 célula en el plano x-z, y tiene unos componentes I_x e I_z ,
 20 que producen unos componentes M_x y M_z de magnetización al-
 calina.

Se puede mostrar que bajo las siguientes condi-
 ciones de campo magnético:

$$|H_x| \ll 1/\gamma, \quad |H_y| \lesssim 1/\gamma,$$

25 y

$$|H_z - (n\omega_c/\gamma)| \ll 1/\gamma \quad (10)$$

donde γ es la relación giromagnética para el átomo alca-
 lino, τ es el tiempo total de relajación alcalino bajo la
 30 influencia de la absorción de luz y de los procedimientos

1 de relajación, ω_c es la frecuencia del campo magnético portador, y n es un entero, el componente x de la intensidad de luz transmitida, I_{tx} , está descrito (excluyendo un término constante) por la relación:

$$5 \quad I_{tx} = \frac{kI_x}{1 + (J_n \gamma H_y \gamma)^2} \sum_{p=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \left[J_+ \right] \left[M_x - M_z (\gamma H_y \gamma) \right] \\ & \cos p \omega_c t + \left[J_- \right] \left[M_z (\gamma H_x \gamma) \right] \sin p \omega_c t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

10

donde k es una constante y J_{\pm} se define como:

$$15 \quad J_{\pm} = J_{n \pm p} (\gamma H_1 / \omega_c) \pm J_{n-p} (\gamma H_1 / \omega_c) \quad (12)$$

15

y donde J_n y $J_{n \pm p}$ son funciones de Bessel de orden n y $n \pm p$, respectivamente, con el mismo argumento $\gamma H_1 / \omega_c$, y H_1 y ω_c son la amplitud y frecuencia, respectivamente, del campo magnético portador.

20

Se observan varios aspectos de la ecuación (11) que son pertinentes para la presente invención:

25

(a) El componente x de la intensidad de luz transmitida, I_{tx} , consiste en la suma de armónicos de la frecuencia portadora, ω_c .

(b) La respuesta en fase ($\cos p \omega_c t$) es lineal en el campo H_y para pequeños valores de H_y .

(c) La respuesta en cuadratura de fase ($\sin p \omega_c t$) es lineal en el campo H_x para pequeños valores de H_x .

30

- (d) El componente x de la intensidad de luz transmitida se puede hacer que sea lineal en H_x solo o en H_y solo, eligiendo una amplitud concreta para el campo magnético portador, H_1 , tal que o bien J_+ o bien J_- , respectivamente, es igual a cero. Para $n = 1$, es muy conveniente ajustar H_1 de tal manera que $J_2(\gamma H_1/\omega_c) = J_0(\gamma H_1/\omega_c)$, con lo que el término $p=1$ de J_- se hace igual a cero. El término $\cos \omega_c t$ de la ecuación 11 puede usarse entonces para producir información de H_y utilizable, y el término $\sin 2\omega_c t$ puede emplearse para desarrollar información de H_x utilizable.
- (e) La respuesta del componente x de la intensidad de luz transmitida a cualquiera de los componentes del campo magnético H_x o H_y es proporcional al producto del componente x de la luz incidente y el componente z de la magnetización, $I_x M_z$. Por tanto, el rayo de luz incidente ha de tener componentes tanto en la dirección x como en la dirección z.
- (f) Debido a las condiciones impuestas a los campos magnéticos, según se define por la ecuación (10) para el caso $n \neq 0$, el campo magnético estacionario se ha de aplicar esencialmente en la dirección z, y la precesión de los momentos nucleares ha de tener lugar esencialmente en el plano x-y. En particular, estos momentos de precesión crean un campo magnético macroscópico que gira a la frecuencia de precesión Larmor, y que tiene una amplitud que es proporcional a la alineación fraccional de los momentos magnéticos nucleares. Este campo magnético en rotación es responsable de un término del componente x de la intensidad de luz trans

mitida, que es debido al componente del eje y de este campo, concretamente:

$$I_{tx} \sim h_a (\cos \omega_a t) (\cos p \omega_c t) \quad (15)$$

5 donde h_a es la amplitud de este campo magnético en rotación y ω_a es la frecuencia de precesión Larmor del gas de momento nuclear. Este es el término que se utiliza para extraer las frecuencias de precesión Larmor nucleares en la realización de la presente invención. El análisis precedente es válido para campos magnéticos estacionarios, y también para campos que varían lentamente, incluyendo el anterior campo magnético en rotación, en particular, siempre que se satisfaga la condición $\omega_a \tau \ll 1$.

10 (g) Los efectos de los componentes de campo magnético estacionario de H_x y H_y se pueden determinar separadamente de las modulaciones de intensidad de la luz, y esto hace posible el medir o controlar independientemente estos componentes de campo.

DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

25 La figura 1 es un dibujo en sección que muestra la disposición física de los componentes de un conjunto de tector de giroscopio de RMN.

La figura 2A es un dibujo en perspectiva que ilustra una parte de los devanados magnéticos para generar el campo del eje z.

30 La figura 3 es un diagrama conceptual que ilus

1 tra los procedimientos de bombeo óptico y de modulación de
la intensidad de la luz que se transmite por la célula de
RMN.

5 La figura 4 es un diagrama de bloques que indica
la mecanización funcional de los elementos electrónicos de
un giroscopio de RMN.

La figura 5 es un diagrama conceptual que mues-
tra una configuración alternativa de un conjunto detector
de giroscopio de RMN. La figura 5 sirve también para ilus-
10 trar la configuración de un aparato de investigación.

DESCRIPCION DETALLADA DE LA REALIZACION PREFERIDA

Con referencia a la figura 1, que es un dibujo
en sección que muestra la disposición física de los compo-
nentes de un conjunto de giroscopio de RMN, se usa una lám-
15 para 10 de vapor de rubidio, que es excitada por una fuen-
te de energía a alta frecuencia, para emitir luz que con-
tiene las líneas espectrales del rubidio. Esta lámpara es
de diseño similar al descrito por Bell, Bloom y Lynch
(Rev.Sci.Instr. 32, 688 (1961)). La lámpara 10 está aloja-
20 da en un recinto 12 que se usa para mantener la lámpara a
una temperatura elevada, adecuada para máxima emisión de
luz. La luz atraviesa una lente 14 condensadora de vidrio,
y una lente 16 colimadora fresnel de plástico, antes de
atravesar un filtro 18 de interferencia óptica. Este fil-
25 tro está diseñado para transmitir la mayoría de la luz de
794,7 nanómetros de longitud de onda de una línea espectral
del rubidio, al tiempo que bloquea la mayoría de la luz de
780,0 nanómetros de longitud de onda de una línea espectral
adyacente. La luz filtrada atraviesa una segunda lente 20
30 colimadora fresnel, se refleja en un prisma 22, para cam-

bien su dirección, y converge en el extremo de un haz 24 de óptica de fibra, de entrada. Este haz de óptica de fibra transmite luego la luz hacia el centro del dispositivo, y forma una curva, de manera que la luz sale por el extremo 5 25 del haz 24 con un ángulo medio de aproximadamente 45 grados respecto a la vertical, como se muestra en el dibujo. El eje vertical, como se muestra en el dibujo, se designa como eje z. El eje x se define como el que apunta a la izquierda en el dibujo. Así, la figura 1 es un dibujo en sección 10 en el plano x-z. La luz que sale del haz atraviesa un polarizador 26 circular, y entra en la célula 28 de RMN.

La célula 28 de RMN es un recinto cilíndrico de vidrio, ópticamente transparente, herméticamente cerrado, que contiene una pequeña cantidad de metal rubidio-87 enriquecido isotópicamente, aproximadamente 0,5 torr de gas xenon-15 129 enriquecido isotópicamente, aproximadamente 20 torr de gas cripton-83 enriquecido isotópicamente, y un gas amortiguador consistente en aproximadamente 400 torr de helio-4 o aproximadamente 100 torr de nitrógeno. Estos se introducen en 20 la célula en el orden indicado, mientras la célula está unida a un punto de llenado de vacío, y luego se cierra herméticamente la célula.

La figura 2B es un dibujo en perspectiva que ilustra la parte de los arrollamientos de campo magnéticos para generar los campos del eje x y del eje y. 25

La célula 28 se monta en un horno 30 de alúmina, con control de temperatura, que se calienta y controla mediante un calentador 32 de banda de resistencia que usa una fuente de energía a alta frecuencia. El horno se mantiene a una temperatura de aproximadamente 65°C, a la cual temperatura se absorbe aproximadamente la mitad de la luz que 30 entra en la célula 28. La mayoría de la luz que no es ab-

sorbida en la célula 28 entra en un haz 36 de óptica de fibra, de salida, y atraviesa una lente 38 hasta un fotodetector 40 de silicio. Otros componentes que se muestran en este dibujo son una estructura 34 de arrollamiento de campo magnético, que se describirá en más detalle más adelante (Figura 2), un conjunto de varias capas de apantallado 42 magnético destinado a atenuar la influencia de los campos magnéticos exteriores, y una estructura 44 de soporte.

La estructura 34 de arrollamiento de campo magnético consiste en una forma de arrollamiento cilíndrica de vidrio mecanizable ("MACOR" de Corning), sobre cuya superficie exterior se han cortado surcos y luego se han dispuestos hilo en los surcos, para formar los arrollamientos de campo magnético.

Las figuras 2A y 2B son un dibujo en perspectiva que ilustra la configuración de los arrollamientos de campo magnético que forman parte de la figura 1 (véase la patente norteamericana Nº 4.063.207). La figura 2A muestra la forma 34 de arrollamiento y los devanados 50 de arrollamiento de solenoide principales que producen un campo magnético que es paralelo al eje del cilindro, que se designa como eje z. Se emplean unos devanados 52 de arrollamiento adicionales en los extremos de la forma de arrollamiento, para mejorar la uniformidad espacial del campo magnético. Los devanados 52 de arrollamiento están entremezclados con los devanados 50 de arrollamiento. La combinación de 50 y 52 se denominará arrollamientos de campo del eje z.

La figura 2B muestra la misma forma 34' de arrollamiento y dos pares de arrollamientos adicionales que

proporcionan campos magnéticos a lo largo de dos ejes, que son mutuamente ortogonales entre ellos y con el eje del cilindro. El par 54 de arrollamientos proporciona un campo magnético a lo largo del eje x, y el par 56 de arrollamientos, del que solo es visible un miembro en el dibujo, proporcione un campo magnético a lo largo del eje y.

La figura 3 es un diagrama conceptual que ilustra, para cada uno de los gases nobles, los procedimientos de bombeo óptico y de modulación de la intensidad de la luz que se transmite a través de la célula de RMN. Debido a que estos procedimientos son muy similares para los dos gases nobles, se ilustran y describen para solo uno de los dos gases nobles. En particular, son aplicables al caso $n = 1$, donde n es según se usa en las ecuaciones (11) y (12). La luz polarizada circularmente que entra en la célula 28' de RMN tiene un componente 64 a lo largo del eje z, que se denomina luz de bombeo óptico, y un componente 66 a lo largo del eje x, que se denomina luz de detección. Por las interacciones de la luz 64 de bombeo óptico y campo 68 magnético estacionario, los átomos 60 de rubidio quedan con sus momentos magnéticos alineados preferentemente en la dirección z. Por colisiones interatómicas, esta alineación del momento magnético se transfiere de los átomos 60 de rubidio a los núcleos 62 del gas noble.

Un campo 70 magnético de retroalimentación, de CA sinusoidal, que está emparejado en frecuencia y fase con la frecuencia de precesión Larmor del momento magnético colectivo de los núcleos 62 de gas noble, se aplica en

la dirección x y sirve para someter a un par de fuerzas el momento magnético de estos núcleos hacia el plano x-y. Este componente de momento magnético nuclear del gas noble realiza luego una precesión al plano x-y a la frecuencia de precesión Larmor del gas noble, ω_a , alrededor del campo magnético continuo. Este componente de momento magnético nuclear en precesión crea un campo magnético de precesión nuclear de intensidad h_a , que gira en el plano x-y y que, por tanto, tiene un componente en la dirección y, que es igual a $(h_a \cos \omega_a t)$.

La luz 66 de detección interacciona con los átomos 60 de rubidio, que están bajo la influencia del campo magnético estacionario, un campo magnético portador de CA superpuesto, y el componente y del campo de precesión nuclear, h_a . Esta interacción hace que la intensidad del componente x de la luz 72 transmitida se module a la frecuencia portadora, ω_c , con una envolvente 74 de modulación a la frecuencia de precesión nuclear, ω_a . Estas modulaciones de luz se convierten luego en señales eléctricas por el fotodetector 40' de silicio.

Con referencia a la Figura 4, que es un diagrama de bloques que indica la mecanización funcional de lo electrónico de un giroscopio de RMN, la luz de la fuente 10 de luz entra en el dispositivo por la óptica 82 de entrada, y atraviesa la célula 28 de RMN. La óptica 82 de entrada comprende los elementos 14 a 26 según se ha indicado antes. La luz que no es absorbida y que se modula en intensidad, como se ha descrito antes (figura 3), es transmitida mediante la óptica 86 de salida al fotodetector 40, donde las modulaciones de la intensidad de la luz

se convierten en una señal 89 eléctrica. La óptica 86 de salida comprende los elementos 36 y 38, según se ha indicado antes. La señal 89 se amplifica primero, y luego se desmodula de forma síncrona en dos operaciones separadas, en un detector 90 de señal portadora, para generar las se-
ñales de control para los campos magnéticos en el eje x y eje y.

Se genera una señal 93 de CC para controlar el campo magnético de CC en el eje y, desmodulando de forma síncrona la señal 89 usando una señal de referencia sinusoidal que tiene una frecuencia, f'_c , que se deriva de una fuente 92 de frecuencia de referencia de precisión, controlada por cristal. La frecuencia y fase de la señal sinusoidal procedente de la fuente 92 son iguales a las del campo magnético portador de CA aplicado. La amplitud de la señal 93 de control de CC es proporcional a la amplitud de aquel componente de las modulaciones de intensidad de la luz, a la frecuencia portadora, que está en fase con el campo magnético portador de CA aplicado. Por referencia a la ecuación (11), esta señal 93 de CC también es proporcional al valor del campo magnético del eje y. La señal 93 de control de CC se suma en el punto 95 con una señal 94 de CC constante adicional, que se genera en los suministros 96 de energía de CC, y la resultante se usa para suministrar la corriente de CC total al arrollamiento 56 de campo magnético del eje y. El campo magnético de CC del eje y se controla así de tal manera que la amplitud de la señal 93 de CC permanece próxima a cero, lo que da como resultado un modo de funcionamiento con portador suprimido. De esta manera, los cambios del

campo magnético del eje y se detectan y corrigen para mantener la supresión del portador.

De manera similar, una señal 104 de CC para controlar el componente de CC del campo magnético del eje x se genera desmodulando de forma síncrona la señal 89, usando una señal de referencia sinusoidal que tiene una frecuencia, $2f'_c$, que se deriva de una fuente 102 de frecuencia de referencia de precisión, controlada por cristal. Ajustando $J_0(\gamma H_1/\omega_c) = J_2(\gamma H_1/\omega_c)$, para $n = p = 1$, el coeficiente del término $\text{sen } \omega_c t$ se hace cero y se utiliza entonces un armónico superior. La señal de referencia a $2f'_c$ generada por la fuente 102 se sincroniza con relación a la señal de referencia f'_c de tal manera que cuando la señal f'_c está representada como $\cos \omega'_c t$, la señal $2f'_c$ está representada como $\text{sen } 2 \omega'_c t$. La amplitud de la señal 104 de control de CC es proporcional al valor del campo magnético del eje x. La señal 104 de control de CC se suma en el punto 107 con una señal 106 de CC constante adicional, que se genera en los suministros 96 de energía de CC, y lo que resulta se usa para suministrar la corriente de CC total al arrollamiento 54 de campo magnético de eje x. De esta manera se controla el valor del componente de CC del campo magnético del eje x, para que sea esencialmente igual a cero.

Además de la señal 93 de CC resultante de la desmodulación síncrona a la frecuencia f'_c en el detector 90 de señal portadora, hay unas señales 109 de CA que son proporcionales a los componentes de CA del campo magnético del eje y. Son de particular interés las modulaciones a las frecuencias de precesión Larmor nucleares. Estas señales se separan y filtran en un separador 110 de señal de precesión nuclear, para producir una señal 112 a la frecuencia de precesión del xenon-129, f_p , de aproximadamente 135 hertzios, una señal 114 a la frecuencia de precesión

1 del cripton-83, f_b , de aproximadamente 19 hertzios, y una
señal 116 a su diferencia de frecuencias, $f_a - f_b$, de apro-
ximadamente 116 hertzios. Estos valores indicados para
las frecuencias de precesión Larmor nuclear son para un
5 valor del campo magnético continuo en el eje z de 0,114
gauss, que se usa en la realización preferida.

Se genera una señal 122 de CC para controlar el
componente de CC del campo magnético del eje z, comparan-
do la diferencia de frecuencias de precesión, $f_a - f_b$, 116,
10 en un comparador 118 de frecuencias, con una frecuencia
de referencia, $f'_a - f'_b$, que es generada por la fuente 120
de frecuencia de referencia de precisión, controlada por
cristal. Cualquier diferencia de fases entre las señales
116 y 120 crea una señal 122 de control de CC que se suma
15 en el punto 123 con una señal 126 de CC constante adicio-
nal, que se genera en los suministros 96 de energía de
CC, y la señal 125 resultante se usa para suministrar la
corriente de CC total al arrollamiento 124 de campo magné-
tico del eje z, que comprende los arrollamientos 50 y 52.
20 De esta manera se controla el valor del componente de CC
del campo magnético del eje z, para que sea igual a un
valor constante específico, según está dado por la ecua-
ción (8).

Una corriente 128 de CA sinusoidal, que es gene-
25 rada por el suministro 130 de campo portador, se aplica
también al arrollamiento 124 de campo magnético del eje
z, para producir un campo magnético portador de CA. La
corriente 128 portadora de CA se suma en el punto 127 con
las corrientes 125 de CC, y lo que resulta constituye la
30 corriente total suministrada al arrollamiento 124 de campo

1 magnético del eje z. La corriente 128 portadora de CA si-
nusoidal tiene una frecuencia, f'_c , que se genera por la
fuente 92 de frecuencia de referencia de precisión, con-
trolada por cristal, que es la misma que la señal usada
5 como señal de referencia para el detector 90 de señal por-
tadora. La frecuencia portadora, f'_c , es aproximadamente
80.000 hertzios, lo que es igual a la frecuencia de prece-
sión Larmor del rubidio-87 para un valor del campo magné-
tico estacionario del eje z de 0,114 gauss, que se usa en
10 la realización preferida.

La amplitud de la corriente 128 portadora de CA
se elige de manera que tenga un valor específico tal que
la amplitud del campo magnético portador de CA sinusoidal
sea igual a un factor concreto multiplicado por el compo-
15 nente de CC del campo magnético del eje z que es produci-
do por la corriente 125 de CC. En la realización preferi-
da, este factor tiene un valor de 1,84, y la amplitud del
campo magnético portador de CA se hace igual a 0,210 gauss.
De esta manera se hace que la amplitud del componente de
20 la señal 89, a la frecuencia portadora, f'_c , sea insensi-
ble a los campos magnéticos del eje x. La base matemática
para esta relación preferida entre los dos campos está
contenida en las ecuaciones (11) y (12) para el caso
 $n = 1$ y $p = 1$.

25 Se crean dos campos magnéticos de retroalimenta-
ción a lo largo del eje x, para conseguir una precesión
mantenida de los momentos magnéticos nucleares del xenon-
-129 y cripton-83. La señal 112 de xenon-129 se usa en
el generador 144 del campo magnético de retroalimentación
30 de CA, para generar una señal 148 de retroalimentación de

1 CA sinusoidal que tiene una amplitud constante, y una fre-
cuencia y fase que son idénticas a las de la señal 112
de xenon-129. La señal 148 se suma con una señal 146 de
retroalimentación de CA sinusoidal, generada de forma si-
5 milar, que se deriva de la señal 114 de cripton-83. La su-
ma 150 de las dos corrientes 146 y 148 de retroalimenta-
ción de CA se suma además, en el punto 107, con las co-
rrientes de CC 104 y 106, y lo que resulta constituye la
10 corriente total que se suministra al arrollamiento 54 del
campo magnético del eje x. La función de los campos magné-
ticos de retroalimentación de CA es someter continuamente
a un par de fuerzas a los momentos magnéticos nucleares
del xenon y cripton, que se han alineado nuevamente a lo
largo del eje z, hacia el plano de precesión x-y, para re-
15 cuperar aquellos momentos que se han perdido por procedi-
mientos de relajación de momento magnético nuclear. De es-
ta manera, la precesión mantenida de los momentos magnéti-
cos del xenon y cripton crea dos campos magnéticos en es-
tado estacionario que giran en el plano x-y, y que en con-
20 secuencia producen modulaciones de la intensidad de la luz
en estado estacionario, a las frecuencias de precesión
Larmor, f_a y f_b .

La velocidad de rotación angular del giroscopio
se obtiene comparando la frecuencia de precesión Larmor,
25 f_a , de la señal 112 de xenon-129, en un comparador 134
de frecuencias, con una frecuencia de referencia f'_a , que
se deriva de una fuente 136 de frecuencia de referencia
de precisión, controlada por cristal. La diferencia de
frecuencias $f'_a - f_a$ resultante es igual a la frecuencia de
rotación angular, f_r , del giroscopio, de acuerdo con la
30

1 ecuación (9), y estos datos 138 se envían a un ordenador
para seguir siendo tratados. Los datos 138 de velocidad
de rotación angular del giroscopio contienen tanto infor-
5 mación de frecuencia como información de fase, y por tan-
to contienen tanto información de velocidad angular como
información de desplazamiento angular, respectivamente.

Todas las fuentes 92, 102, 120 y 136 de frecuen-
cia de referencia de precisión están accionadas por un os-
cilador 152 principal común, controlado por cristal, por
10 técnicas de multiplicación y división digitales. La fre-
cuencia del oscilador 152 principal se indica como f'_m en
la figura 4. Los datos 138 de velocidad de rotación angu-
lar son, en primer orden, independientes de la estabili-
dad de frecuencia del oscilador 152 principal.

15 Con referencia a la figura 5, que es un diagra-
ma conceptual que muestra una realización alternativa de
un conjunto detector de giroscopio de RMN, los elementos
identificados con numerales que llevan prima son funcional-
mente similares a los elementos correspondientes sin pri-
20 ma. La lámpara 10' de rubidio suministra luz de bombeo
óptico a través de la tubería 24' de luz de entrada, a la
célula 28' de RMN. La lámpara 10' suministra también luz
de detección a la célula 28' de RMN, a través de un segun-
do canal que comprende una tubería 154 de luz de entrada
25 y un prisma 155 de entrada. La luz de detección que es
transmitida por la célula 28' de RMN atraviesa el prisma
158 de salida y las tuberías 156 y 160 de luz de salida,
hasta el fotodetector 40'. Se aplican a la célula de RMN
unos campos magnéticos adecuados a través del conjunto
30 161, 162 y 163 de arrollamiento Helmholtz en tres ejes,

1 que en esta disposición son los arrollamientos de campo
para el eje z, eje y, y eje x, respectivamente. La direc-
ción de la luz de entrada a través de la tubería 24' de
luz se define aquí de forma que sea a lo largo del eje z,
5 el eje x está hacia arriba en el dibujo, y el eje y sale
del papel.

La disposición que se muestra en la figura 5 es
una alternativa respecto a la de la figura 1, que sirve
para dar énfasis al hecho de que la detección óptica se
10 debe efectuar en una dirección que sea transversal a la
del campo magnético continuo, que está a lo largo del eje
z. Esto se puede conseguir como se muestra en la figura 1,
usando un ángulo de 45 grados, u otro similar, entre la
dirección del rayo de luz a través de la célula de RMN,
15 respecto a la dirección del campo magnético estacionario,
o, como se muestra en la figura 5, usando dos trayectorias
de luz separadas, siendo la luz de bombeo paralela a la
dirección del campo magnético estacionario, y siendo la
luz de detección transversal a la dirección del campo.
20 En esta disposición se incluye también la posibilidad
de que los rayos de luz de bombeo y de detección se pue-
dan originar en fuentes de luz separadas, y que también
podrían tener diferentes características espectrales o
de polarización.

25 Con ciertas modificaciones, la figura 5 se pue-
de usar también para ilustrar la configuración de un apa-
rato de investigación que es especialmente útil para efec-
tuar investigaciones experimentales de las propiedades de
los sistemas de gas noble-vapor alcalino. Las modifica-
30 ciones consisten en suprimir la trayectoria 154, 155, 156,

1 158, 160 y 40' de luz de detección, y añadir la trayecto-
ria 174 y 175 de luz de salida. Para esta aplicación, que
corresponde al caso de $n = 0$ según se usa en las ecuacio-
nes (11) y (12), los ejes de coordenadas se llaman de
5 otra manera, intercambiando el eje x y el eje z respecto
a lo de antes, de manera que la dirección de la luz de en-
trada a través de la tubería 24' de luz se define ahora
como a lo largo del eje x, y el eje z está hacia arriba
en el dibujo. La luz de entrada atraviesa la célula 28'
10 y pasa a una tubería 174 de luz de salida, que transmite
la luz al fotodetector 175. El campo magnético portador
de CA se aplica usando al arrollamiento 163 de campo del
eje z, y se aplica un pequeño campo de CC, de aproximada-
mente 100 microgauss, usando el arrollamiento 162 de cam-
15 po del eje y. Durante el funcionamiento, un campo de CC
mayor, de aproximadamente 10 miligauss, es aplicado por
el arrollamiento 161 de campo del eje x durante el tiempo
inicial de bombeo de intercambio de espín de momento mag-
nético nuclear. Al término del tiempo de bombeo, que típi-
camente es unos cuantos minutos, este campo se desconecta
20 rápidamente, dejando los momentos magnéticos nucleares
alineados para que realicen la precesión en el plano x-z,
que es el plano del papel. El componente del eje z del
campo magnético nuclear en precesión produce modulaciones
25 de la intensidad de la luz análogas a las descritas antes.
Este modo de funcionamiento es muy similar al descrito
por Cohen-Tannoudji y otros (antes citados), salvo en que
en esta realización alternativa los momentos magnéticos
de rubidio que se usan para detección, y los momentos mag-
néticos nucleares de gas noble que se usan para la prece-

1 sión nuclear Larmor están situados en la misma célula 28'.
La asociación próxima de los átomos de rubidio durante las
colisiones con los átomos de gas noble hace que los átomos
de rubidio detecten un campo magnético medio mucho mayor
5 desde los núcleos del gas noble. Este efecto de proximidad
da como resultado unas señales que son mucho mayores que
las que se podrían detectar de lo contrario. Por tanto,
este aparato es especialmente útil para estudios de inves-
tigación sobre las propiedades del sistemas gas noble-va-
10 por alcalino.

PATENTES RELACIONADAS

A continuación se expone un cierto número de pa-
tentes que están relacionadas con las áreas de la presen-
te invención. Una revista de estas anterioridades indica
15 que ninguna de ellas presenta las nuevas características
expuestas en las reivindicaciones de la presente memoria
descriptiva. Sin embargo, se considera apropiado, para
facilidad de la Oficina de Patentes, incluir toda la téc-
nica anterior que se descubrió durante las búsquedas, y
20 por tanto se relacionan a continuación esas anteriorida-
des:

Patente de EE.UU. N°	Inventor	Enunciado	Expedida
3.103.623	I.A. Greenwood, Jr.	Giroscopio nuclear	10-9-63
3.103.624	I.A. Greenwood, Jr., y otros	Giroscopio nuclear	10-9-63
3.396.329	A. Salvi	Magnetómetros de resonancia magnética para medir campos magnéticos débiles a bordo de un vehículo en movimiento, tal como un avión	6-8-68
3.404.332	A. Abragam y otros	Dispositivos de resonancia magnética para medir con exactitud campos magnéticos, particularmente campos magnéticos bajos, a bordo de un cuerpo móvil	1-10-68
3.500.176	A. Kastler y otros	Método y aparato para controlar un campo magnético empleando resonancia nuclear bombeada ópticamente	10-3-70
3.513.381	W. Happer, Jr.	Luz fuera de resonancia como sonda de vapores alcalinos bombeados ópticamente	19-5-70
3.729.674	J.R. Lowdenslager	Instrumentación giroscópica nuclear digital y bucle cerrado de fase digital para ella	24-4-73

1 En conclusión, la presente invención se ha des-
crito en términos de elementos concretos y disposiciones
físicas concretas, pero está claro que las alternativas ra-
zonables, tales como el uso de diferentes trayectorias ópti-
5 cas que consigan los mismos resultados, o el uso de dife-
rentes combinaciones de los gases nobles, o el uso de una
sustancia diferente del rubidio, o el uso de otros valores
para las frecuencias o los campos magnéticos mencionados
en la anterior memoria descriptiva, pueden estar todas den-
10 tro del alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

5 Los puntos de invención propia y nueva, que se
presentan para que sean objeto de esta solicitud de Patente
de Invención en España, por VEINTE años, son los que
se recogen en las reivindicaciones siguientes:

10 1ª.- Dispositivo de creación y detección de re-
sonancia magnética nuclear que comprende: una célula de re-
sonancia magnética nuclear; un gas o vapor de una sustan-
cia susceptible de bombeo óptico, que posee un momento
magnético y es capaz de ser bombeada ópticamente, estando
15 contenida dicha sustancia susceptible de bombeo óptico en
dicha célula; al menos un gas de momento nuclear, tenien-
do cada uno un momento magnético nuclear, también conteni-
dos en dicha célula, estando al menos parcialmente alinea-
dos los momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos
gases de momento nuclear; medios para aplicar un campo mag-
20 nético estacionario a dicha célula; primeros medios para
iluminar dicha célula con luz de bombeo óptico, capaz de
alinear parcialmente los momentos magnéticos de dicha sus-
tancia susceptible de bombeo óptico, en una dirección,
por absorción de dicha luz; medios para someter a precesión
25 dichos momentos magnéticos nucleares alineados de cada uno
de dichos gases de momento nuclear, alrededor de la direc-
ción del campo magnético estacionario, a las respectivas
frecuencias de precesión Larmor de cada uno de dichos ga-
ses; medios para aplicar un campo magnético portador de
30 CA a la célula; segundos medios para iluminar dicha célu-

la con luz de detección, de una longitud de onda aproximadamente igual a una longitud de onda que pueda ser absorbida por la sustancia susceptible de bombeo óptico; medios para aplicar dicha luz de detección con un componente direccional ortogonal a la dirección de dicho campo magnético portador de CA, para producir modulaciones en la intensidad de la parte transmitida de dicha luz de detección, sustancialmente a la frecuencia de al menos un armónico, incluyendo el fundamental de dicho campo magnético portador de CA de la misma; medios para detectar al menos una de dichas modulaciones en la intensidad de la parte transmitida de dicha luz de detección; y medios para desmodular eléctricamente dichas modulaciones de intensidad de luz detectadas, para obtener una señal que varía a la frecuencia de precesión Larmor de cada uno de dichos gases de momento nuclear, y con una amplitud proporcional al grado de alineación de dichos momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos gases.

2a.- Dispositivo según la reivindicación 1a, donde dicha sustancia susceptible de bombeo óptico es un metal alcalino.

3a.- Dispositivo según la reivindicación 1a, donde cada uno de dichos gases de momento nuclear es un gas noble.

4a.- Dispositivo según la reivindicación 1a, donde dicho campo magnético estacionario tiene un componente paralelo a la dirección de dicha luz de bombeo óptico.

5a.- Dispositivo según la reivindicación 4a, donde dichos momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos gases de momento nuclear son parcialmente alineados

por colisiones de átomos de cada uno de dichos gases de momento nuclear con átomos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico, para transferir parcialmente dicha alineación de dicha sustancia a cada uno de dichos gases.

5 6ª.- Dispositivo según la reivindicación 1ª, donde dichas modulaciones de intensidad de la luz, de dicha parte transmitida de dicha luz de detección, se producen por absorción de dicha luz de detección por la sustancia susceptible de bombeo óptico.

10 7ª.- Dispositivo según la reivindicación 1ª, que comprende además medios para medir con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

15 8ª.- Dispositivo según la reivindicación 1ª, que comprende además medios para controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético de estado estacionario.

20 9ª.- Dispositivo según la reivindicación 1ª, que comprende un oscilador de resonancia magnética nuclear, donde dichos medios de precesión comprenden medios para aplicar un campo magnético de retroalimentación de CA a dicha frecuencia de precesión Larmor detectada de cada uno de los gases de momento nuclear, en una dirección ortogonal respecto a la dirección de dicho campo magnético estacionario, incluyendo además medios para detectar la fase de dicha frecuencia de precesión Larmor, y donde cada una de dichas fases detectadas de dicha frecuencia de precesión Larmor se utiliza para controlar la respectiva fase de dicho campo magnético de retroalimentación de CA, sustancialmente en cuadratura con la fase de dichos momentos magnéticos nucleares en precesión de cada uno de dichos gases, cau

25

30

sando así una precesión mantenida de dichos momentos de cada uno de dichos gases.

5 10^a.- Dispositivo según la reivindicación 9^a, que comprende además medios para medir con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

11^a.- Dispositivo según la reivindicación 9^a, que comprende además medios para controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

10 12^a.- Dispositivo según la reivindicación 1^a, donde el campo magnético continuo tiene una magnitud concreta que hace que la precesión de los momentos magnéticos de dicha sustancial susceptible de bombeo óptico tenga lugar sustancialmente a un armónico de la frecuencia de dicho campo magnético portador de CA aplicado, incluyendo la frecuencia fundamental, y donde la dirección de dicho campo magnético continuo es sustancialmente paralela a la dirección de dicho campo magnético portador de CA aplicado.

15 13^a.- Dispositivo según la reivindicación 12^a, donde dicho campo magnético continuo aplicado a dicha célula de resonancia magnética nuclear excede de 0,01 gauss.

20 14^a.- Dispositivo según la reivindicación 12^a, donde dicha luz de detección es de sustancialmente la misma longitud de onda de dicha luz de bombeo óptico.

25 15^a.- Dispositivo según la reivindicación 14^a, donde dicha luz de detección y dicha luz de bombeo óptico se originan de la misma fuente de luz.

30 16^a.- Dispositivo según la reivindicación 15^a, donde dicha luz de detección y dicha luz de bombeo óptico estén constituidas por componentes paralelos de un solo rayo de luz procedente de dicha fuente de luz.

17ª.- Dispositivo según la reivindicación 15ª, donde dicha luz de detección y dicha luz de bombeo óptico están constituidas por componentes no paralelos de un solo rayo de luz procedente de dicha fuente de luz.

5 18ª.- Dispositivo según la reivindicación 12ª, que comprende un oscilador de resonancia magnética nuclear, donde dichos medios para hacer que los momentos magnéticos alineados de cada uno de dichos gases de momento nuclear realicen la precesión alrededor de la dirección de dicho campo magnético estacionario comprenden medios para apli-
10 car un campo magnético de retroalimentación de CA, en dirección ortogonal respecto a la dirección de dicho campo magnético estacionario, a dicha frecuencia de precesión de Larmor detectada de cada uno de dichos gases de momento nuclear, incluyendo además medios para detectar la fase de
15 cada una de dichas frecuencias de precesión Larmor, y donde dicha fase detectada de cada una de dichas frecuencias de precesión Larmor se utiliza para controlar la fase del correspondiente campo magnético de retroalimentación de
20 CA, para que esté esencialmente en cuadratura con la respectiva fase de dichos momentos magnéticos nucleares en precesión de dicho gas, causando una precesión mantenida de dichos momentos de dicho gas.

25 19ª.- Dispositivo según la reivindicación 18ª, que comprende además medios para desmodular eléctricamente dichas modulaciones de la intensidad de la luz detectada, para obtener señales de control que tienen amplitudes proporcionales a los componentes del campo magnético transversales a dicho campo magnético portador de CA, y
30 que comprende además medios para medir o controlar dichos

componentes de campo transversal.

5 20a.- Dispositivo según la reivindicación 1a, que incluye un dispositivo de alineación de momento magnético nuclear que comprende: unos gases nobles primero y segundo, elegidos de la clase que consiste en isótopos de xenon, teniendo un momento magnético nuclear, e isótopos de cripton teniendo un momento magnético nuclear y contenidos en dicha célula; y medios para iluminar dicha célula con luz de bombeo óptico, capaz de alinear parcialmente en una dirección, por absorción de dicha luz, los momentos magnéticos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico, para hacer que los momentos magnéticos nucleares de dichos gases nobles primero y segundo sean alineados parcialmente por colisiones de átomos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico con átomos de dichos gases nobles.

10 21a.- Dispositivo según la reivindicación 20a, donde dicho campo magnético estacionario tiene un componente paralelo a la dirección de dicha luz de bombeo óptico.

15 22a.- Dispositivo según la reivindicación 21a, donde también está contenida en dicha célula una cantidad sustancial de al menos un gas amortiguador.

20 23a.- Dispositivo según la reivindicación 22a, donde dicho gas amortiguador es helio.

25 24a.- Dispositivo según la reivindicación 22a, donde dicho gas amortiguador es nitrógeno.

30 25a.- Dispositivo según la reivindicación 20a, donde dicha sustancia susceptible de bombeo óptico es un metal alcalino.

26a.- Dispositivo según la reivindicación 25a, donde dicho metal alcalino es rubidio.

5 27a.- Dispositivo según la reivindicación 20a, donde dichos gases nobles primero y segundo son xenon-129 y cripton-83.

28a.- Dispositivo según la reivindicación 20a, que comprende además medios para medir y controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

10 29a.- Dispositivo según la reivindicación 19a, comprendiendo además medios para someter a precesión los momentos magnéticos nucleares alineados de dichos dos gases nobles, alrededor de la dirección del campo magnético estacionario, a las respectivas frecuencias de precesión Larmor de dichos dos gases nobles; y medios para detectar dichas frecuencias de precesión Larmor.

15 30a.- Dispositivo según la reivindicación 29a, que comprende además medios para utilizar la diferencia entre las dos frecuencias de precesión Larmor de dichos dos gases nobles, para fijar con exactitud la magnitud del componente de dicho campo magnético estacionario que es paralelo a dicho campo magnético portador de CA, hasta un nivel predeterminado.

20 31a.- Dispositivo según la reivindicación 29a, que comprende un oscilador de resonancia magnética nuclear, donde dichos medios para hacer que los momentos nucleares alineados de dichos dos gases nobles realicen una precesión alrededor de la dirección de dicho campo magnético estacionario comprenden medios para aplicar, en dirección
25 30 ortogonal a la dirección de dicho campo magnético estacio-

nerio, dos campos magnéticos de retroalimentación de CA a dichas respectivas frecuencias de precesión Larmor detectadas de dichos dos gases nobles, incluyendo además medios para detectar las fases de dichas frecuencias de precesión Larmor, y donde dichas fases detectadas de dichas frecuencias de precesión Larmor se utilizan para controlar las respectivas fases de dichos campos magnéticos de retroalimentación de CA, para que estén esencialmente en cuadratura con las respectivas fases de dichos momentos magnéticos nucleares en precesión de dichos dos gases nobles, causando así una precesión mantenida de dichos momentos de dichos dos gases nobles.

32^a.- Dispositivo según la reivindicación 29^a, que incluye además medios para aplicar un campo magnético portador de CA a dicha célula de resonancia magnética nuclear, y medios para iluminar dicha célula con luz de detección de una longitud de onda aproximadamente igual a una longitud de onda que pueda ser absorbida por la sustancia susceptible de bombeo óptico, donde dicha luz de detección tiene un componente direccional ortogonal a dicho campo magnético portador de CA, incluyendo además medios para producir y detectar la modulación de la intensidad de dicha luz de detección a aproximadamente la frecuencia de al menos un armónico de dicho campo magnético portador de CA, y donde dichos medios para detectar dichas frecuencias de precesión Larmor de dichos dos gases nobles comprenden medios adicionales para desmodular eléctricamente al menos una de dichas modulaciones de intensidad de luz detectadas, para obtener una señal variable a las frecuencias de precesión Larmor de dichos gases nobles, y con am

plitudes proporcionales al grado de alineación de dichos momentos magnéticos nucleares de dichos gases.

5 33^a.- Dispositivo según la reivindicación 31^a, que comprende además medios para medir y controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

10 34^a.- Dispositivo según la reivindicación 32^a, donde el campo magnético estacionario tiene una magnitud concreta que hace que la precesión de los momentos magnéticos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico tenga lugar sustancialmente a un armónico de la frecuencia de dicho campo magnético portador de CA aplicado, incluyendo el fundamental, y donde la dirección de dicho campo magnético estacionario es sustancialmente paralela a la
15 dirección de dicho campo magnético portador de CA aplicado.

20 35^a.- Dispositivo según la reivindicación 34^a, que incluye además medios para medir o controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

25 36^a.- Dispositivo según la reivindicación 35^a, donde dichos medios para controlar dicho campo magnético estacionario comprenden medios para desmodular eléctricamente dichas modulaciones de intensidad de luz detectadas, para obtener señales de control que tienen amplitudes proporcionales a los componentes del campo magnético transversales a dicho campo magnético portador de CA, e incluyendo además medios para medir y controlar dichos componentes de campo transversales y medios para comparar la diferencia de frecuencia entre las dos frecuencias de precesión
30

Larmor con una referencia de precesión de diferencia de frecuencias, para ajustar a un nivel predeterminado la magnitud del componente de dicho campo magnético estacionario que es paralelo a la dirección de dicho campo magnético portador de CA.

5

37^a.- Dispositivo según la reivindicación 1^a, que incluye un dispositivo de alineación de momento magnético nuclear que comprende: una cantidad sustancial de al menos un gas amortiguador, contenido en dicha célula; y medios para iluminar dicha célula con luz de bombeo óptico capaz de alinear parcialmente en una dirección, por absorción de dicha luz, los momentos magnéticos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico, para hacer que los momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos gases de momento nuclear sean alineados parcialmente por colisiones de átomos de dicha sustancia susceptible de bombeo óptico, con átomos de cada uno de dichos gases de momento nuclear.

10

15

38^a.- Dispositivo según la reivindicación 37^a, donde dicho gas noble es xenon-129.

20

39^a.- Dispositivo según la reivindicación 37^a, donde dicha sustancia susceptible de bombeo óptico es un metal alcalino.

40^a.- Dispositivo según la reivindicación 39^a, donde dicho metal alcalino es rubidio.

25

41^a.- Dispositivo según la reivindicación 37^a, donde dicho gas amortiguador es helio.

42^a.- Dispositivo según la reivindicación 37^a, donde dicho gas amortiguador es nitrógeno.

30

43^a.- Dispositivo según la reivindicación 37^a,

donde se proporcionan medios adicionales para medir o controlar con exactitud la magnitud y dirección de dicho campo magnético estacionario.

5 44a.- Dispositivo según la reivindicación 37a, incluyendo además medios para someter a precesión los momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos gases de momento nuclear, alrededor de la dirección del campo magnético estacionario, a la respectiva frecuencia de precesión Larmor de dicho gas, y medios para detectar dicha
10 frecuencia Larmor.

15 45a.- Dispositivo según la reivindicación 44a, que comprende un oscilador de resonancia magnética nuclear donde dichos medios para hacer que los momentos magnéticos nucleares alineados de cada uno de dichos gases de momento nuclear realicen una precesión alrededor de la dirección
20 de dicho campo magnético estacionario comprenden medios para aplicar en dirección ortogonal a la dirección de dicho campo magnético estacionario un campo magnético de retroalimentación de CA a dicha frecuencia de precesión Larmor detectada de cada uno de dichos gases de momento
25 nuclear, incluyendo además medios para detectar la fase de dicha frecuencia de precesión Larmor para controlar la fase de dicho campo magnético de retroalimentación de CA, para que esté esencialmente en cuadratura con la respectiva fase de dichos momentos magnéticos nucleares en precesión de dicho gas, causando así una precesión mantenida de dichos momentos de cada uno de dichos gases.

30 46a.- Dispositivo según la reivindicación 44a, que comprende además medios para aplicar un campo magnético portador de CA a dicha célula, medios para iluminar

dicha célula con luz de detección de una longitud de onda aproximadamente igual a una longitud de onda que pueda ser absorbida por la sustancia susceptible de bombeo óptico, donde dicha luz de detección tiene un componente direccional ortogonal a dicho campo magnético portador de CA, comprendiendo además medios para producir y detectar modulaciones en la intensidad de dicha luz de detección a o cerca de la frecuencia de al menos un armónico de dicha frecuencia del campo magnético portador de CA, y donde dichos medios para detectar dicha frecuencia de precesión Larmor de cada uno de dichos gases de momento nuclear comprenden medios adicionales para desmodular eléctricamente al menos una de dichas modulaciones de la intensidad de la luz detectadas, para obtener una señal que varía a la frecuencia de precesión Larmor de cada uno de dichos gases de momento nuclear, y con amplitudes proporcionales al grado de alineación de dichos momentos magnéticos nucleares de cada uno de dichos gases.

47a.- Dispositivo según la reivindicación 1a, donde dichos medios primeros y segundos iluminan a dicha célula con rayos separados de luz que inciden de diferentes direcciones.

48a.- Dispositivo según la reivindicación 46a, donde dichos primeros medios iluminan dicha célula con luz a lo largo de una dirección sustancialmente paralela a dicho campo magnético estacionario, y dichos segundos medios iluminan a dicha célula con luz a lo largo de una dirección sustancialmente ortogonal a dicho campo magnético estacionario.

49a.- Dispositivo de creación y detección de re

sonancia magnética nuclear.

Tal y como se ha descrito en la Memoria que antecede, representado en los dibujos que se acompañan y para los fines que se han especificado.

5

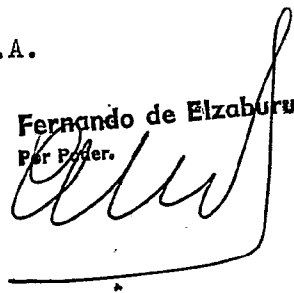
Esta Memoria consta de cuarenta y siete hojas escritas a máquina por una sola cara.

Madrid, 16. MAR 1979

10

P.A.

Fernando de Elizaburu
Por Poder.



15

20

25

30
15.3.79
JMM/.

67881'

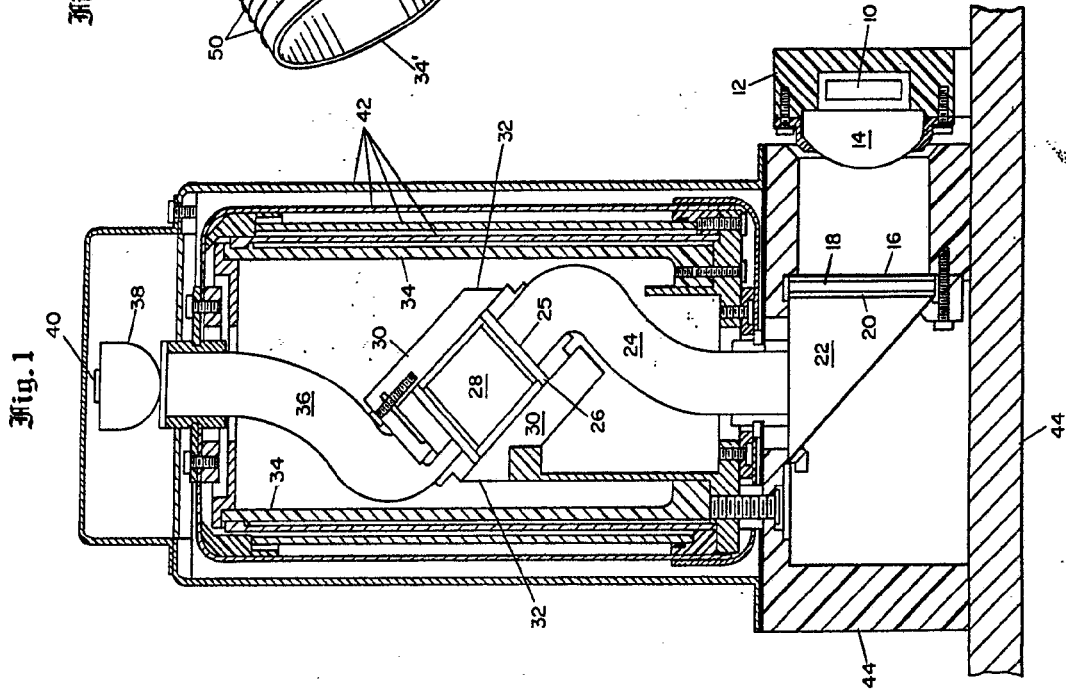


Fig. 1

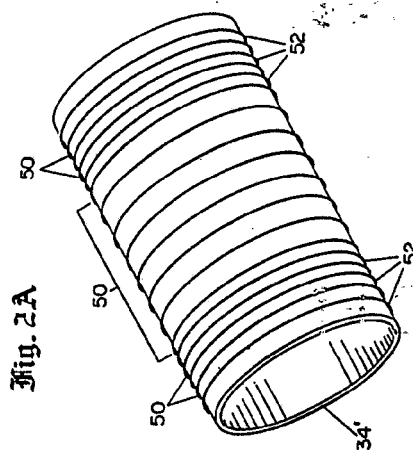


Fig. 2A

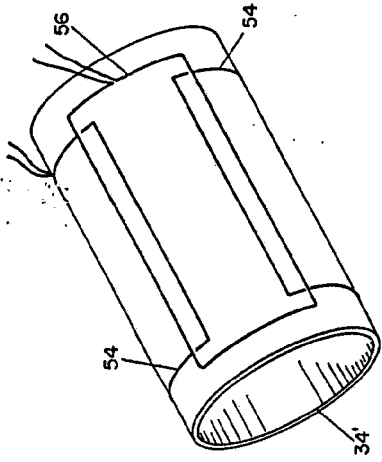


Fig. 2B

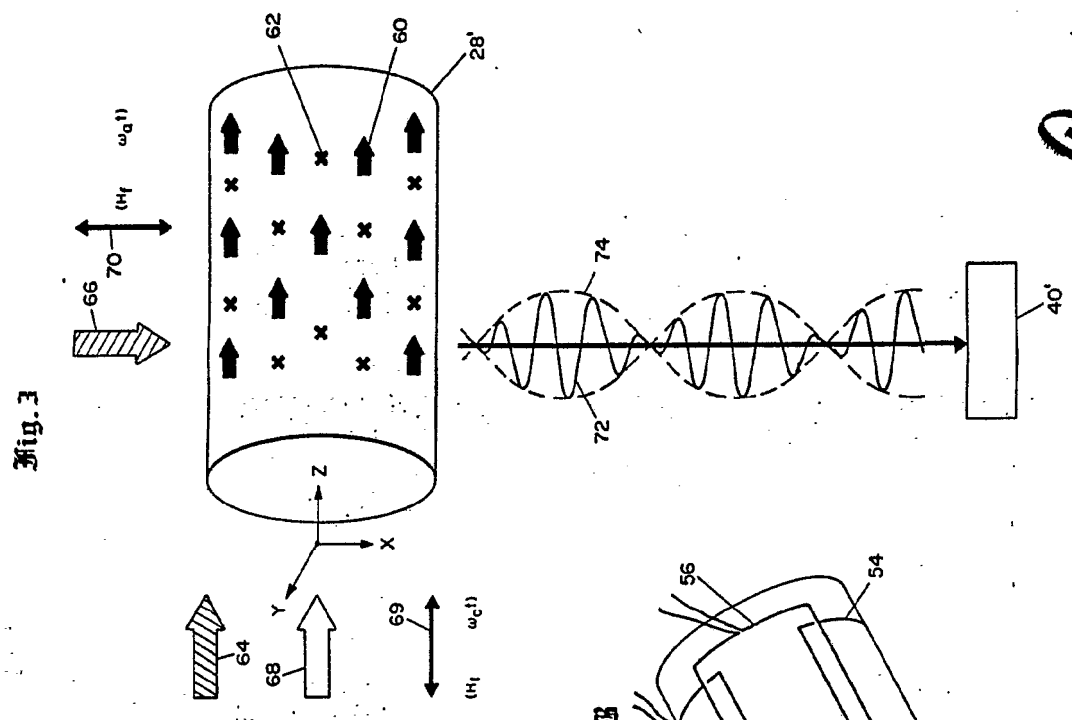


Fig. 3

Handwritten signature or initials

Fig. 1

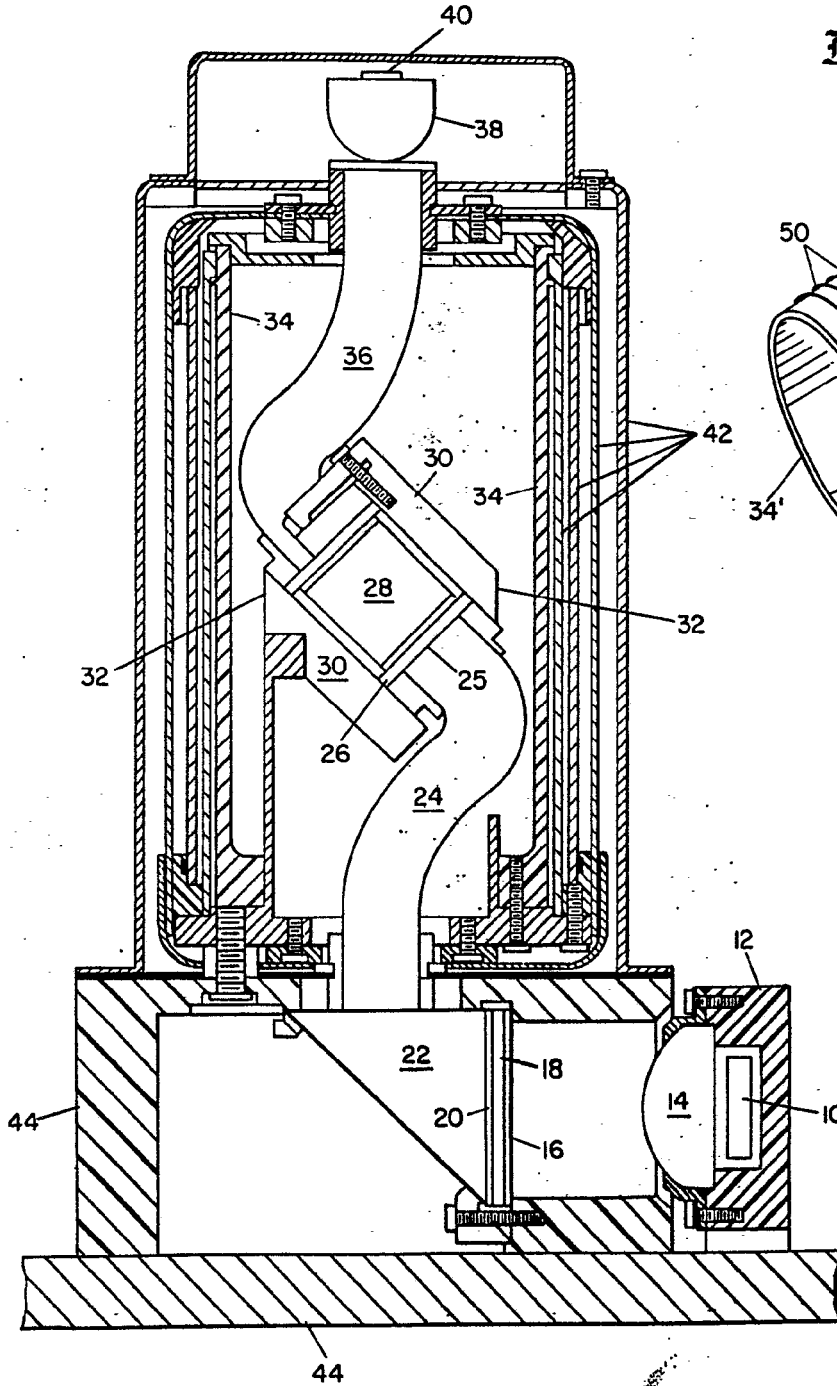


Fig. 2A

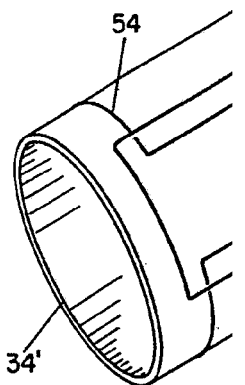
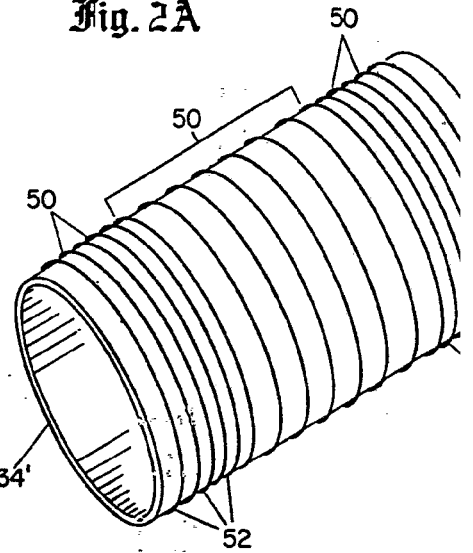


Fig. 3

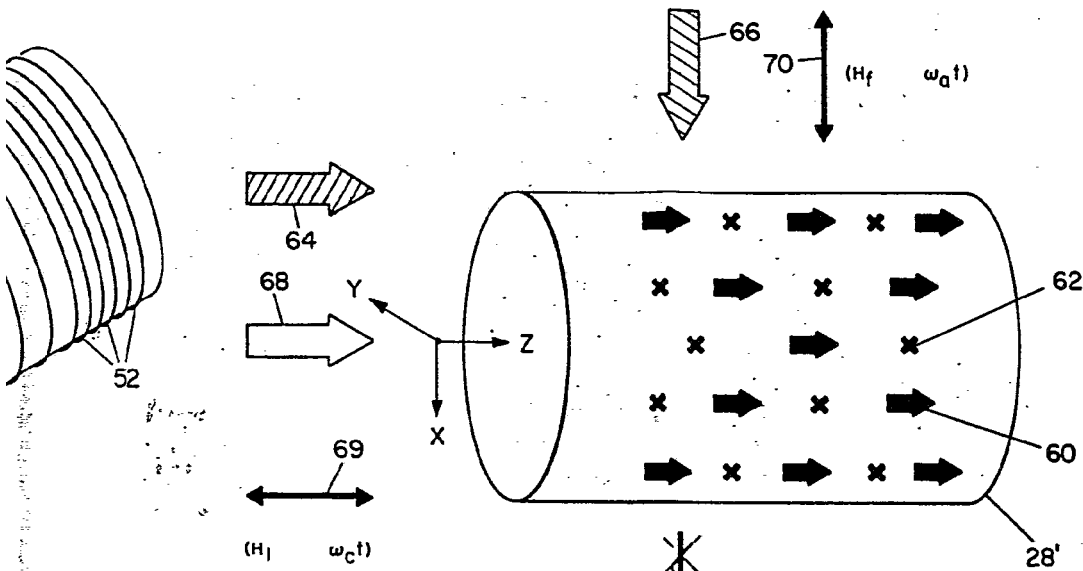
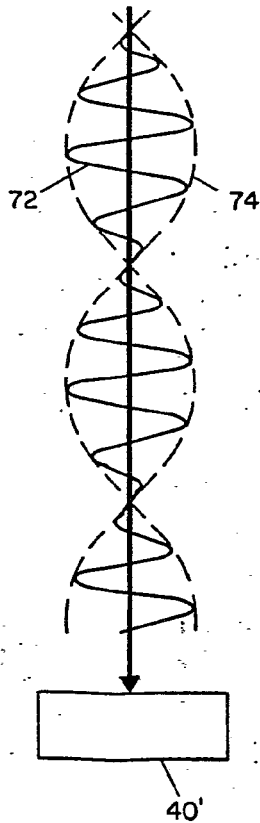
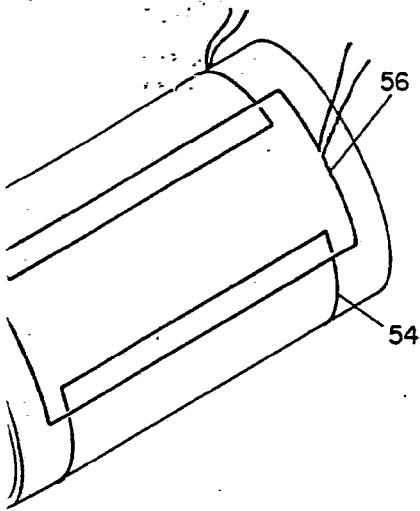


Fig. 2B



Fernando A. Elchuc
1967

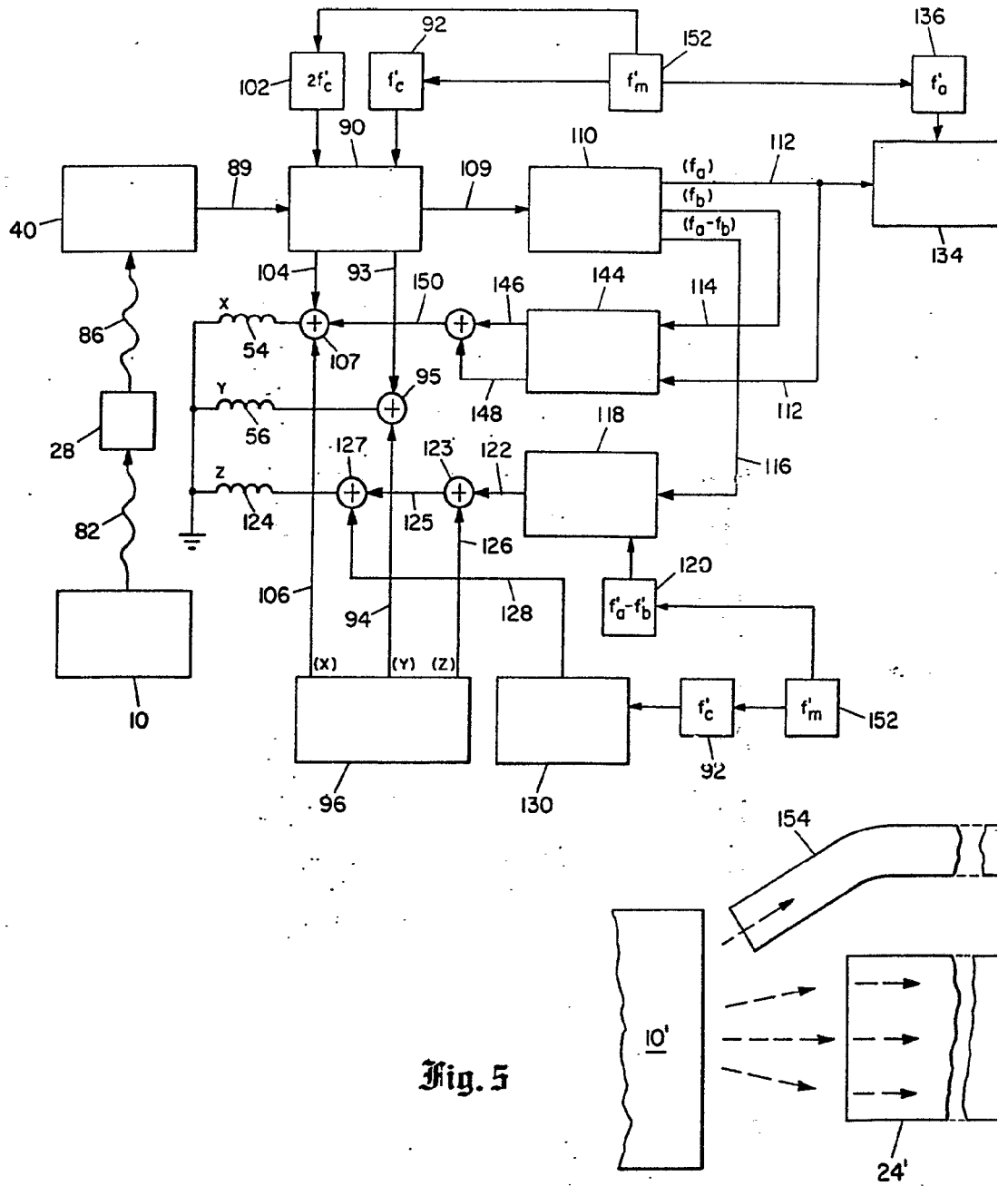


Fig. 5

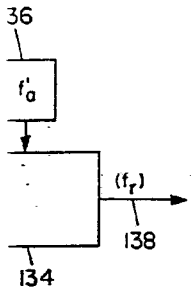
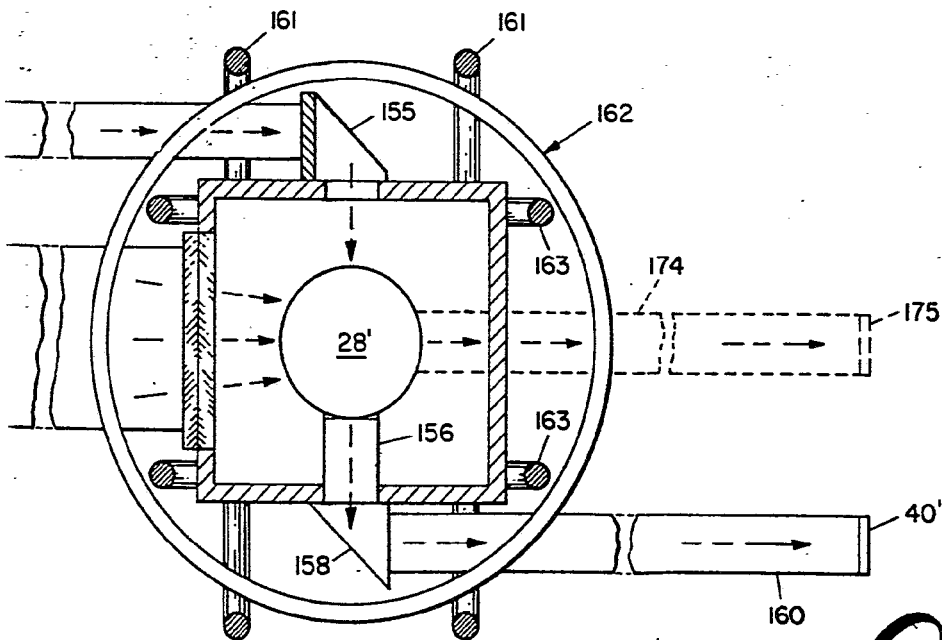


Fig. 4



[Handwritten signature]
Patented in Spain
Per 2000