

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 606 220**

51 Int. Cl.:

H05H 13/02 (2006.01)

H03L 7/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.11.2008 PCT/US2008/084699**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.06.2009 WO09073480**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.11.2008 E 08856764 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.09.2016 EP 2232962**

54 Título: **Concordancia de una frecuencia resonante de una cavidad resonante con una frecuencia de un voltaje de entrada**

30 Prioridad:

30.11.2007 US 948359

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

23.03.2017

73 Titular/es:

**MEVION MEDICAL SYSTEMS, INC. (100.0%)
300 Foster Street
Littleton, MA 01460, US**

72 Inventor/es:

**O'NEAL, CHARLES D.;
MOLZAHN, ADAM C. y
VINCENT, JOHN J.**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 606 220 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

Concordancia de una frecuencia resonante de una cavidad resonante con una frecuencia de un voltaje de entrada.

Campo técnico

5 Esta solicitud de patente describe la concordancia de una frecuencia resonante de una cavidad resonante con una frecuencia de una entrada de voltaje a la cavidad resonante.

Antecedentes

10 A fin de acelerar partículas cargadas a altas energías, se han desarrollado muchos tipos de aceleradores de partículas. Un tipo de acelerador de partículas es un ciclotrón. Un ciclotrón acelera partículas cargadas, en un campo magnético axial, al aplicar un voltaje alterno a una o más Des en una cámara de vacío. El nombre D es descriptivo de la forma de los electrodos en los primeros ciclotrones, aunque puede que no se parezcan a la letra D en algunos ciclotrones. La trayectoria espiral producida por las partículas acelerándose es normal al campo magnético. A medida que las partículas siguen una espiral hacia fuera, un campo eléctrico acelerador se aplica en el entrehierro entre las Des. El voltaje de Radiofrecuencia (RF) crea un campo eléctrico alterno a través del entrehierro entre las Des. El voltaje de RF, y por ello el campo, se sincroniza con el período orbital de las partículas cargadas en el campo magnético, de manera que la forma de onda de radiofrecuencia acelere las partículas cuando cruzan repetidamente el entrehierro. La energía de las partículas aumenta hasta un nivel de energía superior al voltaje pico del voltaje de RF aplicado. A medida que las partículas cargadas se aceleran, sus masas crecen debido a los efectos relativistas. Por consiguiente, la aceleración de las partículas se hace no uniforme y las partículas llegan al entrehierro de modo asíncrono con los picos del voltaje aplicado.

20 El documento US 2007/001128 A1 describe un sincrociclotrón que comprende un circuito resonante que incluye electrodos con un entrehierro entre los mismos, transversal al campo magnético.

25 La patente europea EP 0044153 A1 describe una fuente de señales de ruido de baja fase que incorpora un Oscilador controlado por voltaje (VCO) y una red de realimentación que desmodula efectivamente la señal de salida del VCO y suministra realimentación negativa representativa del ruido de la señal del VCO al terminal de control de frecuencias del VCO.

El documento US 5841237 A describe métodos de inyección de microondas para mejorar el comportamiento de fuentes existentes de iones de Resonancia ciclotrónica de electrones (ECR).

El documento US 6492922 B1 describe un filtro de antisolapamiento con frecuencia adaptable de corte que incluye una sección de calibrador/adaptador y una sección de filtro de antisolapamiento.

30 Dos tipos de ciclotrones empleados actualmente, un ciclotrón isócrono y un sincrociclotrón, superan el desafío del aumento de la masa relativista de las partículas aceleradas de diferentes modos. El ciclotrón isócrono usa una frecuencia constante del voltaje, con un campo magnético que aumenta con el radio, para mantener la aceleración apropiada. El sincrociclotrón usa un campo magnético decreciente con radio creciente y varía la frecuencia del voltaje acelerador para concordar con el aumento de masa causado por la velocidad relativista de las partículas cargadas.

35 Compendio

La presente invención está definida por las reivindicaciones independientes 1 y 9. Las reivindicaciones dependientes representan otras realizaciones de la invención.

40 Se describe en la presente memoria un sincrociclotrón, que comprende: unos toroides magnéticos que definen una cavidad resonante, una fuente para proporcionar voltaje de entrada a la cavidad resonante y una circuitería de realimentación para controlar la fuente de manera que una frecuencia del voltaje de entrada concuerde sustancialmente con una frecuencia resonante de la cavidad resonante. El sincrociclotrón puede incluir también una o más de las siguientes características, solas o en combinación.

45 La fuente puede comprender un oscilador controlado por voltaje (VCO). La circuitería de realimentación puede comprender un detector de fase para detectar una diferencia de fase entre la frecuencia del voltaje de entrada y la frecuencia resonante. El VCO puede estar configurado para cambiar la frecuencia del voltaje de entrada cuando la diferencia de fase se desvía de un valor predeterminado. El detector de fase puede estar configurado para detectar la diferencia de fase al comparar la frecuencia del voltaje de entrada con una frecuencia resonante de un voltaje o una corriente en la cavidad resonante.

50 El sincrociclotrón puede comprender una circuitería para presentar al detector de fase con frecuencias sustancialmente constantes por un intervalo de frecuencias de barrido. Las frecuencias sustancialmente constantes se pueden derivar a partir de una frecuencia del voltaje de entrada y de la frecuencia resonante. La frecuencia resonante puede barrer entre aproximadamente 30 megahercios (MHz) y 300 MHz (VHF) a medida que pasa el

tiempo, p. ej., durante aproximadamente 1 milisegundo (ms). En un ejemplo, la frecuencia puede barrer entre 95 MHz y aproximadamente 135 MHz en aproximadamente 1 ms.

5 El sincrociclotrón puede comprender un integrador para recibir una salida del detector de fase y un filtro para generar una señal de control para el VCO basándose en la salida del detector de fase. La señal de control puede ser para hacer que el VCO cambie la frecuencia del voltaje de entrada cuando la diferencia de fase se desvía del valor predeterminado. El filtro puede comprender un filtro de paso bajo que tiene una frecuencia de corte que es inversamente proporcional a un tiempo de barrido de la frecuencia resonante.

10 El sincrociclotrón puede comprender un circuito de sintonización para cambiar la frecuencia resonante de la cavidad resonante. El circuito de sintonización puede comprender un circuito capacitivo variable que es giratorio y/o un circuito inductivo variable. El sincrociclotrón puede comprender una fuente de iones para proporcionar partículas a la cavidad resonante. El voltaje de entrada puede comprender un voltaje de radiofrecuencia (RF) para extraer partículas de la cavidad resonante. Una combinación del voltaje de RF y de un campo magnético causado por los toroides magnéticos puede hacer que se aceleren las partículas extraídas de la cavidad resonante.

15 Se describe también en la presente memoria un aparato que comprende estructuras magnéticas que definen una cavidad resonante, una fuente para proporcionar partículas a la cavidad resonante, una fuente de voltaje para proporcionar voltaje de radiofrecuencia (RF) a la cavidad resonante, un detector de fase para detectar una diferencia de fase entre el voltaje de RF y una frecuencia resonante de la cavidad resonante, que cambia a medida que pasa el tiempo, y un circuito de control, sensible a la diferencia de fase, para controlar la fuente de voltaje de manera que una frecuencia del voltaje de RF concuerde sustancialmente con la frecuencia resonante de la cavidad resonante. El aparato puede incluir también una o más de las siguientes características, solas o en combinación.

20 El circuito de control puede comprender un integrador para generar una señal de control de corriente en respuesta a la diferencia de fase y un filtro de paso bajo para generar, en respuesta a la señal de corriente, una señal de control de voltaje para la fuente de voltaje.

25 La cavidad resonante puede comprender una primera D para recibir el voltaje de RF y una segunda D que está conectada eléctricamente a tierra. Un espacio entre la primera D y la segunda D forma un entrehierro. La primera D y la segunda D definen un circuito resonante sintonizable configurado para crear un campo eléctrico oscilante a través del entrehierro en respuesta al voltaje de RF. Un elemento de captación de voltaje/corriente puede estar asociado con la cavidad resonante, que se puede usar para obtener la frecuencia instantánea de la cavidad resonante y para proporcionar una muestra de voltaje/corriente al detector de fase.

30 Se describe también en la presente memoria una circuitería para hacer concordar sustancialmente una frecuencia resonante de una cavidad resonante con una frecuencia de un voltaje de entrada a la cavidad resonante. La frecuencia resonante cambia a medida que pasa el tiempo. La circuitería comprende un detector de fase para detectar una diferencia de fase entre la frecuencia resonante y el voltaje de entrada. El detector de fase es para emitir una primera señal que corresponde a la diferencia. Un integrador y un circuito de filtro están configurados para generar una señal de control en respuesta a la primera señal. Un oscilador controlado por voltaje está configurado para regular el voltaje de entrada en respuesta a la señal de control. La circuitería puede incluir también una o más de las siguientes características, solas o en combinación.

35 El detector de fase puede estar configurado para obtener la frecuencia de resonancia a partir de un voltaje de la cavidad resonante o a partir de una corriente de la cavidad resonante. La frecuencia resonante puede barrer por un intervalo de frecuencias de aproximadamente 30 MHz a 300 MHz en un tiempo predefinido. En un ejemplo, el barrido puede ser entre aproximadamente 95 MHz y aproximadamente 135 MHz. El integrador y el circuito de filtro pueden comprender un filtro de paso bajo que tiene una frecuencia de corte que es inversamente proporcional al tiempo predefinido. La cavidad resonante puede ser parte de un sincrociclotrón que está configurado para acelerar protones desde la cavidad resonante.

45 La circuitería puede comprender un elemento de captación asociado con la cavidad resonante. El elemento de captación puede ser para obtener una señal correspondiente a la frecuencia resonante. El detector de fase puede ser para recibir la señal desde el elemento de captación. El elemento de captación puede ser capacitivo y la señal puede comprender una señal de voltaje. El elemento de captación puede ser inductivo y la señal puede comprender una señal de corriente.

50 Se describe también en la presente memoria un método para hacer concordar una frecuencia resonante de una cavidad resonante con una frecuencia de un voltaje de entrada a la cavidad resonante, en el que la frecuencia resonante cambia a medida que pasa el tiempo. El método comprende detectar una diferencia de fase entre la frecuencia resonante y el voltaje de entrada, en el que una primera señal corresponde a la diferencia, generar una señal de control en respuesta a la primera señal y regular el voltaje de entrada en respuesta a la señal de control. El método puede incluir también una o más de las siguientes características, solas o en combinación.

55 La detección de la diferencia de fase puede comprender obtener la frecuencia de resonancia a partir de uno de un voltaje de la cavidad resonante y una corriente de la cavidad resonante. La frecuencia resonante puede barrer por un intervalo de frecuencias de aproximadamente 30 MHz a aproximadamente 300 MHz en aproximadamente un

tiempo predefinido. La señal de control puede ser un circuito de filtro de paso bajo que tiene una frecuencia de corte que es inversamente proporcional al tiempo predefinido. La cavidad resonante puede ser parte de un sincrociclotrón que está configurado para acelerar protones desde la cavidad resonante.

- 5 El método puede comprender obtener una señal correspondiente a la frecuencia resonante. La diferencia de fase entre la frecuencia resonante y el voltaje de entrada se puede determinar basándose en la señal correspondiente a la frecuencia resonante.

Lo anterior no está limitado a su uso con un sincrociclotrón, sino más bien se puede usar con cualquier tipo de ciclotrón.

Se pueden combinar una cualquiera o más de las características anteriores.

- 10 Los detalles de uno o más ejemplos se exponen en los dibujos que se acompañan y en la descripción que sigue. Características, aspectos y ventajas adicionales resultarán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

Descripción de los dibujos

La figura 1A es una vista, en sección transversal, de un sincrociclotrón.

- 15 La figura 1B es una vista lateral, en sección transversal, del sincrociclotrón mostrado en la figura 1A.

La figura 2 es una ilustración de una forma de onda idealizada que se puede usar, en el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B, para acelerar partículas cargadas.

La figura 3 es un diagrama de bloques de un circuito de control que se puede usar en el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B.

- 20 La figura 4 es un gráfico que muestra un barrido de frecuencia de una frecuencia resonante en una cavidad resonante del sincrociclotrón.

La figura 5 incluye unos diagramas de temporización que muestran una salida de un detector de fase utilizado en el circuito de control de la figura 3, en respuesta a dos entradas.

- 25 La figura 6 es un diagrama de bloques de un circuito alternativo de control que se puede usar en el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B.

Descripción detallada

Se describe en la presente memoria un sistema basado en un sincrociclotrón. Sin embargo, los circuitos y los métodos descritos en la presente memoria se pueden usar con cualquier tipo de ciclotrón.

- 30 Haciendo referencia a las figuras 1A y 1B, un sincrociclotrón incluye unas bobinas eléctricas 2a y 2b alrededor de dos polos magnéticos 4a y 4b metálicos separados, que están configurados para generar un campo magnético. Los polos magnéticos 4a y 4b están definidos por dos partes opuestas de unos toroides 6a y 6b (que se muestran en sección transversal). El espacio entre los polos 4a y 4b define una cámara de vacío 8 o una cámara de vacío independiente puede estar instalada entre los polos 4a y 4b. La intensidad del campo magnético es, en general, una función de la distancia desde el centro de la cámara de vacío 8 y está determinada, en gran medida, por la elección de la forma geométrica de las bobinas 2a y 2b y la forma y el material de los polos magnéticos 4a y 4b.

- 35 Los electrodos aceleradores están definidos como una D 10 y una D 12, que tienen un entrehierro 13 entre las mismas. La D 10 está conectada a un potencial de voltaje alterno cuya frecuencia cambia de alta a baja durante un ciclo acelerador a fin de tener en cuenta la masa relativista creciente de una partícula cargada y el campo magnético radialmente decreciente (medido desde el centro de la cámara de vacío 8) producido por las bobinas 2a y 2b y las partes de polo 4a y 4b. El perfil característico del voltaje alterno en las Des 10 y 12 se muestra en la figura 2 y se describirá con detalle en lo que sigue. En este ejemplo, la D 10 es una estructura semicilíndrica, que está hueca por dentro. La D 12, denominada también la "D ficticia", no tiene que ser una estructura cilíndrica hueca, ya que está a tierra en las paredes 14 de la cámara de vacío. La D 12, como se muestra en las figuras 1A y 1B, incluye una tira de metal, p. ej., de cobre, que tiene una ranura conformada para concordar con una ranura sustancialmente similar en la D 10. La D 12 puede estar conformada para constituir una imagen especular de una superficie 16 de la D 10.

- 40 Una fuente de iones 18, que incluye un electrodo de fuente de iones 20, está situada en el centro de la cámara de vacío 8 y se hace funcionar para proporcionar partículas cargadas. Unos electrodos de extracción 22 dirigen las partículas cargadas hacia dentro de un canal de extracción 24, formando por ello un haz 26 de las partículas cargadas. La fuente de iones puede estar montada también externamente y proporcionar los iones de modo sustancialmente axial hacia dentro de la zona de aceleración. La fuente de iones puede ser del tipo descrito en la solicitud de patente de EE. UU. número 11/948.662, titulada "Interrupted Particle Source".
- 45

Las Des 10 y 12 y otras piezas del equipo incluidas en un sincrociclotrón definen un circuito resonante sintonizable bajo una entrada de voltaje oscilante que crea un campo eléctrico oscilante a través del entrehierro 13. El resultado es una cavidad resonante en la cámara de vacío 8. Esta frecuencia resonante de la cavidad resonante se puede sintonizar para mantener alto su factor Q durante un barrido de frecuencia usando un mecanismo de sintonización.

5 En un ejemplo, la frecuencia resonante de la cavidad resonante se mueve, o “barre”, entre aproximadamente 30 megahercios (MHz) y aproximadamente 300 MHz (la VHF tradicional) en aproximadamente 1 milisegundo (ms). En otro ejemplo, la frecuencia resonante de la cavidad resonante se mueve, o “barre”, entre aproximadamente 95 MHz y aproximadamente 135 MHz en aproximadamente 1 milisegundo (ms).

10 El factor Q es una medida de la “calidad” de un sistema resonante en su respuesta a frecuencias próximas a la frecuencia resonante. En este ejemplo, el factor Q está definido como

$$Q = 1/R \times \sqrt{L/C},$$

donde R es la resistencia activa del circuito resonante, L es la inductancia y C es la capacitancia de dicho circuito resonante.

15 El mecanismo de sintonización puede ser, p. ej., una bobina de inductancia variable o una capacitancia variable. Un dispositivo de capacitancia variable puede ser una lámina vibrante o un condensador rotatorio. En el ejemplo mostrado en las figuras 1A y 1B, el mecanismo de sintonización incluye un condensador rotatorio 28. El condensador rotatorio 28 incluye unas cuchillas rotatorias 30 que son accionadas por un motor 31. Durante cada cuarto de ciclo del motor 31, a medida que las cuchillas 30 encajan con unas cuchillas 32, aumenta la capacitancia del circuito resonante, que incluye las Des 10 y 12 y el condensador rotatorio 28, y disminuye la frecuencia resonante. El proceso se invierte a medida que se desencajan las cuchillas. Así, se cambia la frecuencia resonante al cambiar la capacitancia del circuito resonante. Esto sirve al objetivo de reducir, en un gran factor, la potencia requerida para generar el alto voltaje aplicado a las Des y necesaria para acelerar el haz de partículas. La forma de las cuchillas 30 y 32 puede estar mecanizada para crear la dependencia requerida de la frecuencia resonante en el tiempo.

25 La rotación de las cuchillas puede estar sincronizada con la generación de frecuencia de RF de manera que, al variar el factor Q de la cavidad resonante, la frecuencia resonante del circuito resonante definida por el sincrociclotrón se mantenga próxima a la frecuencia del potencial de voltaje alterno aplicado a la cavidad resonante.

Un sistema de bombeo de vacío 40 mantiene la cámara de vacío 8 a una presión muy baja para no dispersar el haz acelerador.

30 Para conseguir una aceleración uniforme en el sincrociclotrón, la frecuencia y la amplitud del campo eléctrico a través del entrehierro de la D se varía para tener en cuenta el aumento de la masa relativista y la variación radial del campo magnético, así como para mantener el foco del haz de partículas. La variación radial del campo magnético se mide como la distancia desde el centro de una trayectoria espiral de una partícula cargada.

35 La figura 2 es una ilustración de una forma de onda idealizada que se puede requerir para acelerar partículas cargadas en un sincrociclotrón. Muestra solamente unos pocos ciclos de la forma de onda y no representa necesariamente los perfiles de modulación de frecuencia y amplitud ideales. La figura 2 ilustra las propiedades de amplitud y frecuencia variables en el tiempo de la forma de onda utilizada en el sincrociclotrón. La frecuencia cambia de alta a baja a medida que aumenta la masa relativista de la partícula, mientras la velocidad de las partículas se aproxima a una fracción significativa de la velocidad de la luz.

40 En un acelerador de partículas de tipo sincrociclotrón, a medida que las partículas ganan energía, sus frecuencias cambian de manera relativamente rápida con el paso del tiempo. Por consiguiente, para cambiar la frecuencia resonante del sincrociclotrón, las propiedades inductivas y/o capacitivas de dicho sincrociclotrón se varían mecánicamente, como se ha descrito anteriormente (p. ej., usando un condensador rotatorio 31). A fin de generar un voltaje a través del entrehierro de la D que asegure que las partículas ganan suficiente energía para acelerarse a velocidad máxima a medida que cambia la frecuencia resonante, se debería suministrar potencia a la cavidad resonante durante todo un período de aceleración del haz de partículas. Para conseguir el voltaje requerido usando una baja cantidad de potencia, la frecuencia del voltaje de RF de entrada (o aplicado) debería concordar con la frecuencia resonante de la cavidad resonante.

45 Se puede emplear en el sincrociclotrón una topología de bucle de enganche de fase digital para hacer concordar sustancialmente la frecuencia del voltaje de RF de entrada con la frecuencia resonante de la cavidad resonante. En este contexto, una concordancia sustancial incluye una concordancia exacta o una concordancia que es suficientemente próxima para obtener beneficios similares a una concordancia exacta.

50 Como se ha explicado anteriormente, la frecuencia resonante de la cavidad resonante puede cambiar por un amplio intervalo a un régimen de velocidad relativamente alto; en un ejemplo, la frecuencia resonante puede barrer a 40 MHz en 1 ms. El sistema de control utilizado en la topología de bucle de enganche de fase, a modo de ejemplo, incluye un circuito de realimentación de bucle cerrado para detectar una diferencia de fase entre la frecuencia del

voltaje de RF de entrada y la frecuencia resonante de la cavidad resonante, para generar una señal de error proporcional a la diferencia de fase y para activar un oscilador controlado por voltaje (VCO) de banda ancha para ajustar la frecuencia del voltaje de RF de entrada a fin de mantener la resonancia. Una ventaja de usar el bucle de enganche de fase descrito en la presente memoria para este objetivo es que la circuitería utilizada en su implementación puede estar situada suficientemente lejos de la cámara de haces del sincrociclotrón como para estar fuera de su campo de radiación.

La figura 3 muestra un ejemplo de un sistema de control 40 que se puede usar para hacer concordar la frecuencia del voltaje de RF de entrada con la frecuencia resonante de una cavidad resonante 38 (en la cámara de vacío 8) en el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B. El sistema de control 40 incluye un detector de fase 41, un filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje y un VCO 44.

El detector de fase 41 puede ser cualquier tipo de circuito de detección de fase que sea capaz de identificar una diferencia de fase entre las frecuencias de dos señales de entrada. El detector de fase 41 se implementa en hardware en este ejemplo; sin embargo, en otros ejemplos, el detector de fase se puede implementar usando software. Las señales de entrada pueden incluir cualquier combinación de señales, tales como dos señales de voltaje o una señal de voltaje y una señal de corriente. La salida del detector de fase 41 es una señal que corresponde a la diferencia detectada de fase. En este ejemplo, la salida del detector de fase 41 es un pulso de corriente que tiene una longitud que corresponde a la diferencia detectada de fase.

El filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje incluye un integrador para sumar los pulsos de corriente desde el detector de fase 41 a medida que pasa el tiempo y un filtro de bucle para generar una señal de control de voltaje para el VCO 44 a partir de los pulsos de corriente integrados. Una función de transferencia del filtro de bucle es una impedancia, ya que el filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje transforma la corriente conmutada del detector de fase en un voltaje para el VCO. En un ejemplo, la función de transferencia puede ser

$$\frac{V_{salida}}{I_{entrada}} = -\frac{R_1 C_1 s + 1}{s C_1},$$

donde R_1 y C_1 son los valores resistivos y capacitivos del filtro de bucle.

El ancho de banda del filtro de bucle se establece por una combinación de R_1 y C_1 , y puede tener un valor que es aproximadamente 1/3 de un límite de modulación del VCO. Este valor se puede establecer con vistas a proporcionar al VCO 44 suficiente tiempo para responder a una señal de control de entrada a fin de mantener una estabilidad del bucle. Además, la salida del filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje se puede filtrar con paso bajo, p. ej., para eliminar el ruido de alta frecuencia. El filtro de paso bajo puede ser un circuito Resistivo-capacitivo (RC) que es parte del filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje, o está separado del mismo. Una frecuencia de corte del filtro de paso bajo se puede basar en un tiempo de barrido ($T_{barrido}$) de la frecuencia resonante de la cavidad resonante. El tiempo de barrido hace referencia al tiempo que tarda la frecuencia resonante para moverse, o "barrer", a través de todas las frecuencias posibles, p. ej., entre 95 MHz y 135 MHz. La frecuencia de corte del filtro de paso bajo puede estar definida por la siguiente ecuación

$$\frac{1}{1,1 * 2 * \tau_{barrido}}.$$

La configuración anterior permite que el circuito de control 40 siga un barrido de frecuencia que es aproximadamente lineal durante un tiempo especificado de barrido, $T_{barrido}$ 43 de la figura 4, a la vez que se reducen las oscilaciones no deseadas en una respuesta de régimen permanente.

El VCO 44 es un oscilador electrónico que está controlado por una señal de voltaje de entrada para oscilar a una frecuencia particular. En este caso, la señal de voltaje de entrada es el voltaje de salida del filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje. El voltaje de salida del VCO 44 se aplica a la cavidad resonante (p. ej., a la D 10), como se muestra en la figura 3. El voltaje de salida del VCO 44 se aplica también a una entrada al detector de fase 41.

Durante el funcionamiento del sistema de control 40, un elemento de captación en la cavidad resonante obtiene una señal que corresponde a una frecuencia resonante de la cavidad resonante. Ya que, en resonancia, voltaje y corriente están en fase, la señal puede ser una señal de voltaje o una señal de corriente. Un circuito capacitivo en la cavidad resonante se puede usar para obtener la señal de voltaje. Un circuito inductivo en la cavidad resonante se puede usar para obtener la señal de corriente. En esta implementación, hay poca corriente en la cavidad resonante; por consiguiente, un circuito capacitivo (p. ej., uno o más condensadores) obtiene una señal de voltaje.

La señal de voltaje se aplica a una entrada 45 del detector de fase 41. La otra entrada 46 del detector de fase 41 recibe la salida del VCO 44 (es decir, el voltaje de RF de entrada a la cavidad resonante). Las señales tienen una diferencia de fase de 0° y, así, están en fase, si la frecuencia de la salida del VCO concuerda con la frecuencia resonante (variable en el tiempo) de la cavidad resonante. Si las dos no concuerdan, o entran dentro de una tolerancia predefinida, p. ej., definida por el detector de fase 41, dicho detector de fase 41 emite un pulso de corriente. El pulso de corriente tiene una anchura que es proporcional a la diferencia de fase detectada por el detector de fase y está firmado para indicar si la salida del VCO (entrada 46) adelanta o retrasa la frecuencia resonante (entrada 45). Una salida 47, a modo de ejemplo, del detector de fase 41, en respuesta a las entradas 49 y 50, se muestra en la figura 5.

El filtro de bucle 42 integrante de conversión de corriente a voltaje incluye un integrador que recibe los pulsos de corriente de salida del detector de fase 41 y que suma los pulsos de corriente de salida a medida que pasa el tiempo. La suma resultante se aplica a un filtro de bucle interno, que genera una señal de control de voltaje para el VCO 44. La señal de control de voltaje se filtra con paso bajo para eliminar, p. ej., componentes de ruido de alta frecuencia, y se aplica al VCO 44. El VCO 44 genera un voltaje de RF de salida para compensar sustancialmente la diferencia entre la frecuencia anterior del voltaje de entrada y la frecuencia anterior de la cavidad resonante. Por ejemplo, cuanto mayor es la diferencia de fase, mayor puede ser el voltaje de RF de salida del VCO 44. La salida del VCO 44 se proporciona a la cavidad resonante, p. ej., a la D 10, y a la entrada 45 del detector de fase 41. El proceso anterior se repite para las nuevas frecuencias del voltaje de entrada y de la cavidad resonante.

En una implementación, la función de transferencia de bucle abierto del sistema de control 40 es como sigue:

$$G = - \frac{k_d * k_v * \omega_v R_1 C_1 s + k_d k_v \omega_v}{R_2 C_1 C_2 s^4 + (C_1 + R_1 C_1 C_2 \omega_v) s^3 + C_1 \omega_v s^2},$$

donde k_d es una ganancia de corriente de un chip de Bucle de enganche de fase (PLL) utilizado para implementar el detector de fase, k_v es una ganancia del VCO, ω_v es un límite de la frecuencia de modulación del VCO, R_1 y C_1 son elementos resistivos y capacitivos del integrador y R_2 y C_2 son elementos resistivos y capacitivos del filtro de paso bajo.

El sistema de control descrito en la presente memoria no está limitado a su uso con el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B, o incluso con sincrociclotrones en general, sino más bien se puede usar en cualquier tipo de ciclotrón en el que la frecuencia resonante de la cavidad resonante tenga un régimen de seguimiento relativamente alto, p. ej., una frecuencia que barre del orden de decenas de megahercios en aproximadamente uno o varios milisegundos.

Además, el sistema de control descrito en la presente memoria no está limitado a la configuración específica mostrada en la figura 3. Más bien, cualquier circuitería que implemente la misma, o funciones similares, se puede usar para implementar el sistema de control.

La figura 6 muestra otro ejemplo de un sistema de control 55 que se puede implementar en un ciclotrón, tal como el sincrociclotrón de las figuras 1A y 1B. El ejemplo de la figura 6 usa circuitos mezcladores (denominados en la presente memoria "mezcladores") para presentar al detector de fase con frecuencias sustancialmente constantes por sustancialmente todo el intervalo de frecuencias que barre la cavidad resonante 56 (en un ejemplo, entre aproximadamente 95 megahercios (MHz) y aproximadamente 135 MHz en aproximadamente 1 milisegundo (ms)).

En la figura 6, la salida 57 (f_2) del oscilador controlado por voltaje (VCO) 59, que se aplica a la cavidad resonante 56, es mezclada también con una frecuencia 60 (f_1) sustancialmente constante, que se puede aplicar mediante un circuito 61 de generación de señales. En este ejemplo, un mezclador 62 actúa como un multiplicador de ondas sinusoidales. La multiplicación de las dos ondas sinusoidales f_1 y f_2 , como sigue

$$f_1 = A \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad \text{y} \quad f_2 = B \sin(\omega_2 t + \theta_2)$$

produce una señal 64 (f_3) constituida por la suma, y la diferencia, de las dos frecuencias f_1 , f_2 de la señal original, como sigue:

$$f_3 = f_1 f_2 = \frac{AB}{2} (\cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_2)),$$

donde $\Phi_1 = \theta_1 - \theta_2$ y $\Phi_2 = \theta_1 + \theta_2$. La señal f_3 se filtra con paso bajo mediante un filtro de paso bajo 65 para producir una señal filtrada f_4 , como sigue:

$$f_4 = \frac{AB}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1)$$

Ya que la salida del VCO 59 es una frecuencia que varía a medida que pasa el tiempo, la frecuencia resonante, ω_2 , de la cavidad resonante 56 varía a medida que pasa el tiempo y, también, la salida del mezclador 62 varía a medida que pasa el tiempo. La salida de la cavidad resonante, f_5 , es como sigue:

$$f_5 = C \text{sen}(\omega_2 t + \theta_3)$$

- 5 La señal filtrada f_4 66 es mezclada con la entrada a la cavidad, f_2 57, y la salida de la cavidad resonante, f_5 69, mediante unos mezcladores 70 y 71, respectivamente, para producir dos señales, f_6 , f_7 , como sigue:

$$f_6 = f_2 f_4 = \frac{AB^2}{4} (\cos((2 * \omega_2 - \omega_1)t + \theta_2 - \phi_1 - 90) - \cos(\omega_1 t + \theta_2 + \phi_1 + 90))$$

y

$$f_7 = f_4 f_5 = \frac{ABC}{4} (\cos((\omega_1 - 2\omega_2)t - \theta_3 + \phi_1 + 90) - \cos(\omega_1 t + \theta_3 + \phi_1 + 90)).$$

- 10 Unos filtros de paso de banda 72 y 74 filtran con paso de banda las señales f_6 y f_7 , respectivamente, en una frecuencia central de ω_1 para producir unas señales f_8 76 y f_9 77, como sigue:

$$f_8 = -\frac{AB^2}{4} \cos(\omega_1 t + \theta_2 + \phi_1 + 90) \quad \text{y} \quad f_9 = -\frac{ABC}{4} \cos(\omega_1 t + \theta_3 + \phi_1 + 90)$$

- 15 En este ejemplo, para realizar un seguimiento de frecuencias, un detector de fase 80 determina la diferencia de fase entre la entrada 57 a la cavidad resonante y la salida 69 de la cavidad resonante y conduce esta diferencia hasta aproximadamente cero. La diferencia, θ , en las componentes de fase de las señales f_5 y f_6 es como sigue:

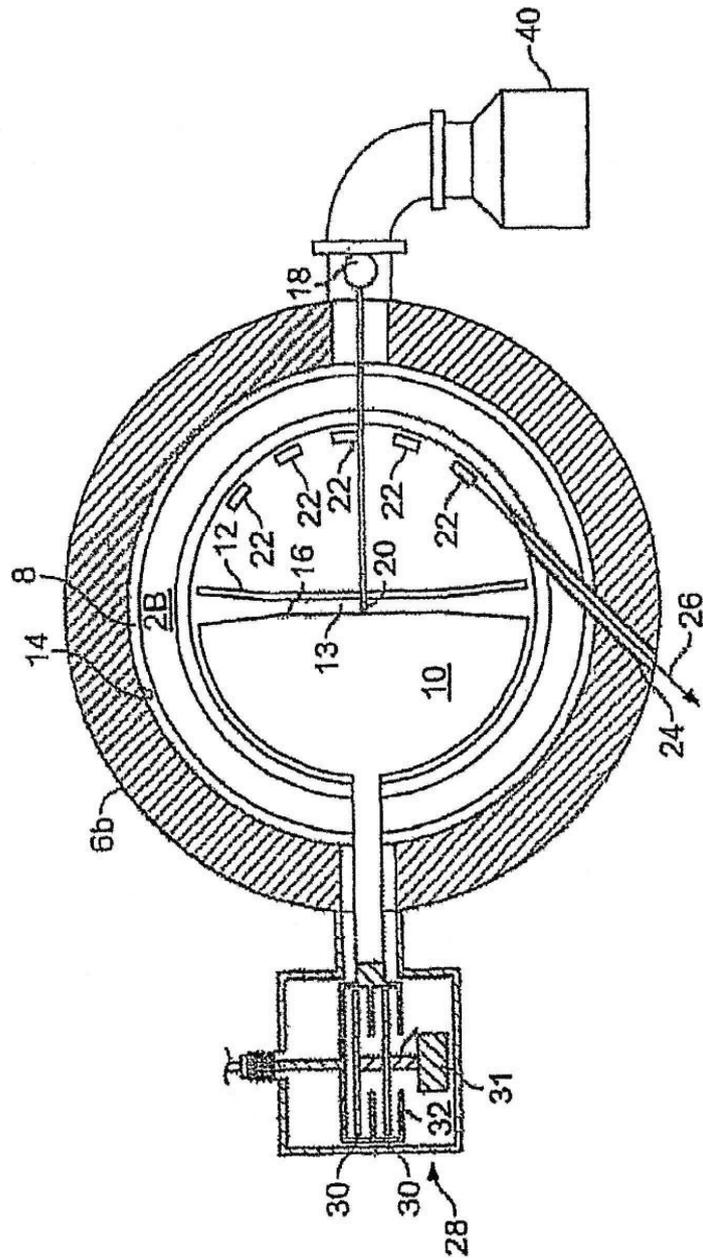
$$\Theta = (\theta_2 + \phi_1 + 90) - (\theta_3 + \phi_1 + 90) = \theta_2 - \theta_3.$$

- 20 Esta es la diferencia de fase entre la entrada 57 y la salida 69 de la cavidad resonante 56. En este caso, la frecuencia de las señales de entrada al detector de fase 80 son sustancialmente constantes a una frecuencia ω_1 , independientemente de la frecuencia de salida, ω_2 , para cualquier instante, t . La salida del detector de fase 80 se introduce en un filtro de bucle 81 y se procesa del mismo modo que se ha descrito con respecto a la figura 3.

REIVINDICACIONES

1. Un sincrociclotrón, que comprende:
- 5 unos toroides magnéticos (6a, 6b) que definen una cavidad resonante (56); una fuente para proporcionar voltaje de entrada a la cavidad resonante (56), comprendiendo la fuente un oscilador controlado por voltaje (VCO) (59); y una circuitería de realimentación para controlar la fuente de manera que una frecuencia del voltaje de entrada concuerde sustancialmente con una frecuencia resonante de la cavidad resonante (56), comprendiendo la circuitería de realimentación:
- 10 un detector de fase (80) para detectar una diferencia de fase entre la frecuencia del voltaje de entrada y la frecuencia resonante y para emitir un pulso de corriente; un integrador para recibir pulsos de corriente de salida del detector de fase (80) y para sumar los pulsos de corriente de salida a medida que pasa el tiempo; y
- un filtro para generar una señal de control para el VCO basándose en los pulsos de corriente integrados, haciendo la señal de control que el VCO (59) cambie la frecuencia del voltaje de entrada cuando la diferencia de fase se desvía de un valor predeterminado, y
- 15 una circuitería conectada al detector de fase (80) y configurada para emitir señales de entrada (f_8 , f_9) al detector de fase (80), de manera que las frecuencias de las señales de entrada (f_8 , f_9) sean sustancialmente constantes por un intervalo de frecuencias con el que se barre la cavidad resonante (56).
2. El sincrociclotrón según la reivindicación 1, en el que el filtro comprende un filtro de paso bajo que tiene una frecuencia de corte que es inversamente proporcional a un tiempo de barrido de la frecuencia resonante.
3. El sincrociclotrón según la reivindicación 1, en el que el detector de fase (80) está configurado para detectar la diferencia de fase al comparar la frecuencia del voltaje de entrada con una frecuencia resonante de un voltaje en la cavidad resonante (56).
- 20 4. El sincrociclotrón según la reivindicación 1, en el que el detector de fase (80) está configurado para detectar la diferencia de fase al comparar la frecuencia del voltaje de entrada con una frecuencia resonante de una corriente en la cavidad resonante (56).
- 25 5. El sincrociclotrón según la reivindicación 1, en el que la frecuencia resonante barre entre aproximadamente 30 megahercios (MHz) y aproximadamente 300 MHz en aproximadamente 1 milisegundo (ms).
6. El sincrociclotrón según la reivindicación 6, que comprende además:
- un circuito de sintonización para cambiar la frecuencia resonante de la cavidad resonante (56),
- 30 en el que el circuito de sintonización comprende: un circuito capacitivo variable que es giratorio; o un circuito inductivo variable.
7. El sincrociclotrón según la reivindicación 1, que comprende además:
- una fuente de iones para proporcionar partículas a la cavidad resonante (56),
- en el que el voltaje de entrada comprende un voltaje de radiofrecuencia (RF) para extraer partículas de la cavidad resonante (56); y
- 35 en el que una combinación del voltaje de RF y de un campo magnético causado por los toroides magnéticos (6a, 6b) hace que se aceleren las partículas extraídas de la cavidad resonante (56).
8. Un método para hacer concordar un voltaje de entrada a una cavidad resonante (56) con una frecuencia resonante de la cavidad resonante, en el que la cavidad resonante (56) está definida por unos toroides magnéticos (6a, 6b), comprendiendo el método:
- 40 proporcionar el voltaje de entrada a la cavidad resonante (56) usando una fuente que comprende un oscilador controlado por voltaje (VCO) (59); y
- controlar la fuente usando una circuitería de realimentación de manera que una frecuencia del voltaje de entrada concuerde sustancialmente con una frecuencia resonante de la cavidad resonante (56), comprendiendo la circuitería de realimentación:
- 45 un detector de fase (80) para detectar una diferencia de fase entre la frecuencia del voltaje de entrada y la frecuencia resonante y para emitir un pulso de corriente; un integrador para recibir pulsos de corriente de salida del detector de fase (80) y para sumar los pulsos de corriente de salida a medida que pasa el tiempo; y

- un filtro para generar una señal de control para el VCO basándose en los pulsos de corriente integrados, haciendo la señal de control que el VCO (59) cambie la frecuencia del voltaje de entrada cuando la diferencia de fase se desvía de un valor predeterminado, y
- 5 una circuitería conectada al detector de fase (80) y configurada para emitir señales de entrada (f_8 , f_9) al detector de fase (80), de manera que las frecuencias de las señales de entrada (f_8 , f_9) sean sustancialmente constantes por un intervalo de frecuencias con el que se barre la cavidad resonante (56).
9. El método según la reivindicación 8, que comprende además derivar las frecuencias sustancialmente constantes a partir de una frecuencia del voltaje de entrada y de la frecuencia resonante.
- 10 10. El método según la reivindicación 8, en el que el filtro comprende un filtro de paso bajo que tiene una frecuencia de corte que es inversamente proporcional a un tiempo de barrido de la frecuencia resonante.
11. El método según la reivindicación 8, en el que el detector de fase (80) detecta la diferencia de fase al comparar la frecuencia del voltaje de entrada con una frecuencia resonante de un voltaje en la cavidad resonante (56).
12. El método según la reivindicación 8, en el que el detector de fase (80) detecta la diferencia de fase al comparar la frecuencia del voltaje de entrada con una frecuencia resonante de una corriente en la cavidad resonante (56).
- 15 13. El método según la reivindicación 8, en el que la frecuencia resonante barre entre 30 megahercios y 300 MHz en 1 milisegundo.
14. El método según la reivindicación 13, en el que la cavidad resonante (56) es parte de un sincrociclotrón que comprende:
- 20 un circuito de sintonización para cambiar la frecuencia resonante de la cavidad resonante (56), en el que el circuito de sintonización comprende:
- un circuito capacitivo variable que es giratorio; o un circuito inductivo variable.
15. El método según la reivindicación 8, en el que la cavidad resonante (56) es parte de un sincrociclotrón que comprende:
- una fuente de iones que proporciona partículas a la cavidad resonante (56),
- 25 en el que el voltaje de entrada comprende un voltaje de radiofrecuencia (RF) para extraer partículas de la cavidad resonante (56); y
- en el que una combinación del voltaje de RF y de un campo magnético causado por los toroides magnéticos (6a, 6b) hace que se aceleren las partículas extraídas de la cavidad resonante (56).



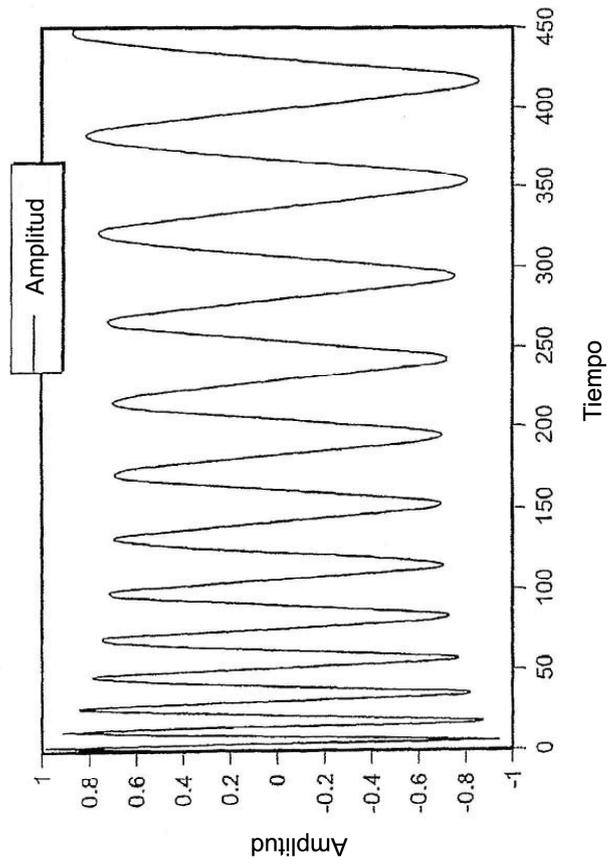


FIG. 2

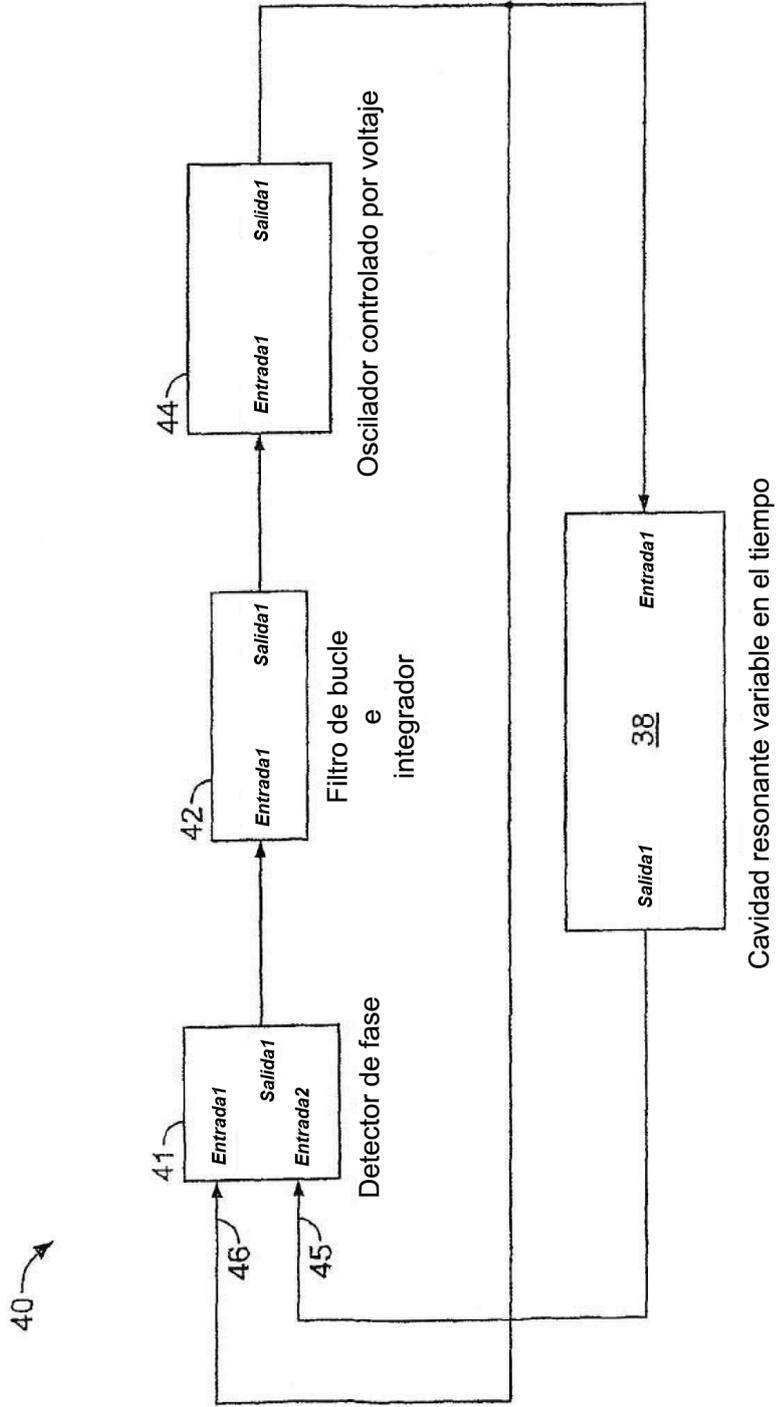


FIG. 3

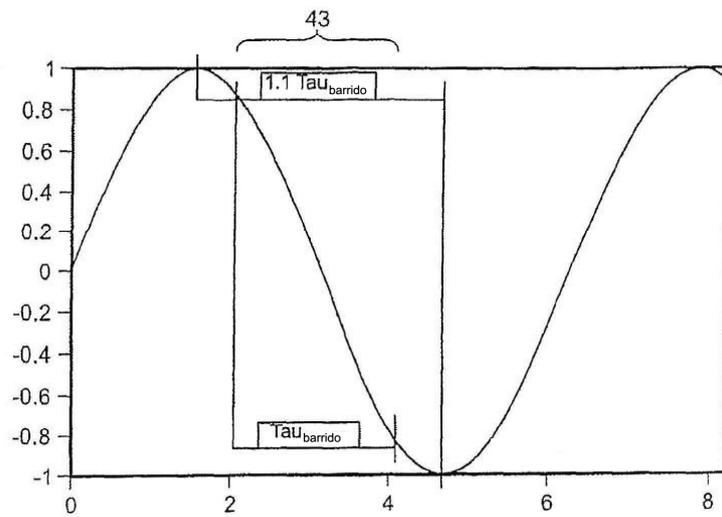


FIG. 4

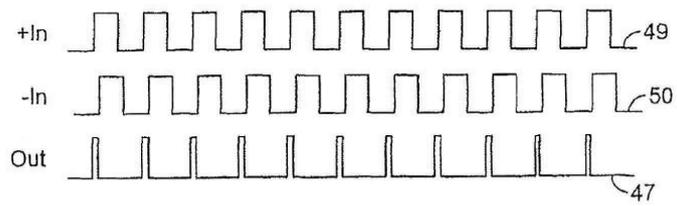
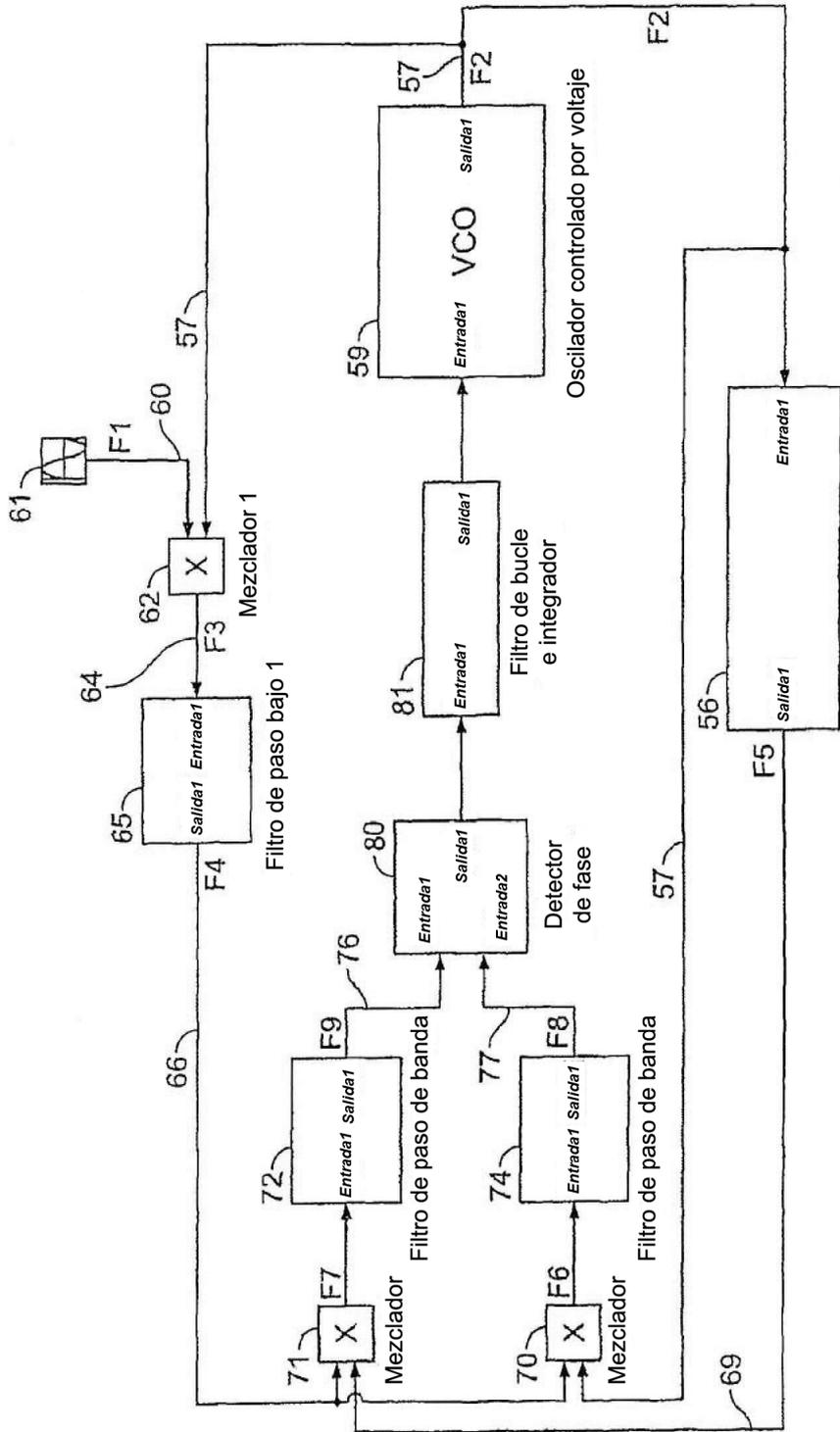


FIG. 5



Cavidad resonante variable en el tiempo

FIG. 6