

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 626 631**

51 Int. Cl.:

H05H 13/00 (2006.01)

H01J 37/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.11.2008 PCT/US2008/084695**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.06.2009 WO09070588**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.11.2008 E 08855024 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.03.2017 EP 2232961**

54 Título: **Fuente de partículas interrumpida con partes separadas**

30 Prioridad:

30.11.2007 US 948662

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

25.07.2017

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**GALL, KENNETH y
ZWART, GERRIT TOWNSEND**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 626 631 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

Fuente de partículas interrumpida con partes separadas.

Campo técnico

Esta solicitud de patente describe un acelerador de partículas que tiene una fuente de partículas que es interrumpida en una región de aceleración.

Antecedentes

5 Con el fin de acelerar las 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 las partículas cargadas en un campo magnético axial aplicando un voltaje alterno a una o más des en una cámara de vacío. El nombre de es descriptivo de la forma de los electrodos en los primeros ciclotrones, aunque pueden no parecerse a la letra D en algunos ciclotrones. La trayectoria en espiral desarrollada por las partículas aceleradas es perpendicular al campo magnético. A medida que las partículas salen en espiral, se aplica un campo eléctrico de aceleración en el espacio entre los des. La tensión de radiofrecuencia (RF) crea un campo eléctrico alterno a través del espacio entre los des. La tensión de RF, y por lo tanto el campo, se sincroniza con el periodo orbital de las partículas cargadas en el campo magnético, de manera que las partículas son aceleradas por la forma de onda de radiofrecuencia cuando cruzan repetidamente el espacio. La energía de las partículas aumenta hasta un nivel de energía muy superior a la tensión de pico de la tensión de RF aplicada. A medida que las partículas cargadas aceleran, sus masas crecen debido a los efectos relativistas. En consecuencia, la aceleración de las partículas varía la coincidencia de fase en el espacio.

20 Dos tipos de ciclotrones empleados actualmente, un ciclotrón isócrono y un sincrociclotrón, superan el reto de aumentar la masa relativista de las partículas aceleradas de diferentes maneras. El ciclotrón isócrono utiliza una frecuencia constante de la tensión con un campo magnético que aumenta con el radio para mantener la aceleración adecuada. El sincrociclotrón utiliza un campo magnético decreciente con un radio creciente para proporcionar un enfoque axial y varía la frecuencia de la tensión de aceleración para que coincida con el aumento de masa causado por la velocidad relativista de las partículas cargadas.

25 El documento WO 2007/061937 A2 describe un acelerador que está montado en un pórtico para permitir que el acelerador se mueva a través de un intervalo de posiciones alrededor de un paciente sobre un soporte de paciente. El acelerador está configurado para producir un haz de protones o iones que tiene un nivel de energía suficiente para alcanzar cualquier blanco arbitrario en el paciente desde las posiciones dentro del intervalo. El haz de protones o iones pasa esencialmente directamente desde el acelerador al paciente.

30 El documento WO 2006/012467 A2 describe un sincrociclotrón que comprende un circuito resonante que incluye electrodos que tienen un espacio entre ellos a través del campo magnético. Una entrada de tensión oscilante, que tiene una amplitud y una frecuencia variables determinadas por un generador de forma de onda digital programable, genera un campo eléctrico oscilante a través del espacio. El sincrociclotrón puede incluir un condensador variable para variar la frecuencia de resonancia. El sincrociclotrón puede incluir además un electrodo de inyección y un electrodo de extracción que tienen tensiones controladas por el generador de forma de onda digital programable.

35 T. Yamaya et al: "Una pequeña fuente de cátodo frío de iones pesados o un ciclotrón compacto", Instrumentos y métodos nucleares en investigación física, vol. 226, páginas 219 - 222 (1984), describe el desarrollo de una pequeña fuente de cátodo frío de iones PIG para iones pesados de carga múltiple para el ciclotrón compacto de la Universidad de Tohoku.

40 W. Kleeven: "ciclotrones para inyección y extracción", Procedimientos de la escuela especializada de aceleradores del CERN en pequeños aceleradores, 26 de octubre de 2006, páginas 271-296, describe los objetivos de diseño para la inyección de haces y los problemas especiales relacionados con una región central con la fuente de iones interna. Se discuten los principios de ciclotrones con fuentes de iones internas, en particular una fuente PIG y se dan varios ejemplos de simulaciones numéricas. Se describe que el uso de una fuente de iones interna es la solución más simple y menos costosa para la inyección de iones en un ciclotrón. Además de la eliminación de la línea de inyección, una ventaja principal reside en la compacidad del diseño.

Resumen

45 La invención se refiere a un sincrociclotrón como se define en la reivindicación 1.

50 El sincrociclotrón comprende estructuras magnéticas para proporcionar un campo magnético a una cavidad y una fuente de partículas para proporcionar una columna de plasma a la cavidad. La fuente de partículas tiene una envolvente para contener la columna de plasma, en donde la envolvente es interrumpida de tal manera que la envolvente está completamente separada en la región de aceleración. La envolvente comprende dos partes que están completamente separadas en una región de aceleración para exponer a la columna de plasma. Una fuente de tensión está configurada para proporcionar una tensión de radiofrecuencia (RF) a la cavidad para acelerar las partículas de la columna de plasma en la región de aceleración. El sincrociclotrón descrito anteriormente puede

incluir una o más de las siguientes características, solas o en combinación, como se describe en las reivindicaciones adjuntas.

5 El campo magnético puede estar por encima de 2 Tesla (T) y las partículas pueden acelerarse de la columna de plasma hacia el exterior en espirales con radios que aumentan progresivamente. La fuente de tensión puede comprender un primer de que está conectado eléctricamente a una tensión alterna y un segundo de que está conectado eléctricamente a tierra. Al menos parte de la fuente de partículas puede pasar a través del segundo de. El sincrociclotrón puede comprender un tope en la región de aceleración. El tope puede ser para bloquear la aceleración de al menos algunas de las partículas de la columna de plasma. El tope puede ser, en esencia, ortogonal a la región de aceleración y puede estar configurado para bloquear determinadas fases de partículas de la columna de plasma.

10 El sincrociclotrón puede comprender cátodos para su uso en la generación de la columna de plasma. Los cátodos pueden ponerse en funcionamiento para impulsar una tensión para ionizar gas para generar la columna de plasma. Los cátodos pueden estar configurados para impulsar a tensiones entre aproximadamente 1 kV y aproximadamente 4 kV. Los cátodos no necesitan ser calentados por una fuente de calor externa. El sincrociclotrón puede comprender un circuito para acoplar la tensión desde la tensión de RF al al menos uno de los cátodos. El circuito puede comprender un circuito capacitivo.

15 Las estructuras magnéticas pueden comprender yugos magnéticos. La fuente de voltaje puede comprender un primer de que está conectado eléctricamente a una tensión alterna y un segundo de que está conectado eléctricamente a tierra. El primer de y el segundo de pueden formar un circuito resonante ajustable. La cavidad a la que se aplica el campo magnético puede comprender una cavidad resonante que contiene el circuito resonante ajustable.

20 En general, esta solicitud de patente también describe un acelerador de partículas que no es parte de la invención que comprende un tubo que contiene un gas, un primer cátodo adyacente a un primer extremo del tubo y un segundo cátodo adyacente a un segundo extremo del tubo. Los cátodos primero y segundo son para aplicar tensión al tubo para formar una columna de plasma a partir del gas. Las partículas están disponibles para ser extraídas de la columna de plasma para la aceleración. Un circuito está configurado para acoplar energía desde un campo de radiofrecuencia (RF) externo a al menos uno de los cátodos. El acelerador de partículas descrito anteriormente puede incluir una o más de las siguientes características, ya sea solas o en combinación.

25 El tubo puede ser interrumpido en una región de aceleración a la que las partículas se han extraído de la columna de plasma. El primer cátodo y el segundo cátodo no necesitan ser calentados por una fuente externa. El primer cátodo puede estar en un lado diferente de la región de aceleración que el segundo cátodo.

30 El acelerador de partículas puede comprender una fuente de tensión para proporcionar el campo de RF. El campo de RF puede ser para acelerar las partículas de la columna de plasma en la región de aceleración. La energía puede comprender una parte del campo de RF proporcionado por la fuente de tensión. El circuito puede comprender un condensador para acoplar energía desde el campo externo a al menos uno del primer cátodo y el segundo cátodo.

35 El tubo puede comprender una primera parte y una segunda parte que están completamente separadas en un punto de interrupción en la región de aceleración. El acelerador de partículas puede comprender un tope en la región de aceleración. El tope puede utilizarse para bloquear al menos una fase de las partículas de una aceleración adicional.

40 El acelerador de partículas puede comprender una fuente de tensión para proporcionar el campo de RF a la columna de plasma. El campo de RF puede ser para acelerar las partículas de la columna de plasma en la región de aceleración. El campo de RF puede comprender una tensión que es inferior a 15 kV. Los yugos magnéticos se pueden utilizar para proporcionar un campo magnético que cruza la región de aceleración. El campo magnético puede ser mayor que aproximadamente 2 Tesla (T).

45 En general, esta solicitud de patente también describe un acelerador de partículas que no es parte de la invención que comprende una fuente de un manómetro de ionización Penning (PIG) que comprende una primera parte tubular y una segunda parte tubular que están separadas al menos parcialmente en una región de aceleración. La primera parte tubular y la segunda parte tubular son para contener una columna de plasma que se extiende a través de la región de aceleración. Se utiliza una fuente de tensión para proporcionar una tensión en la región de aceleración. La tensión es para acelerar las partículas fuera de la columna de plasma en la región de aceleración. El acelerador de partículas descrito anteriormente puede incluir una o más de las siguientes características, ya sea solas o en combinación.

50 La primera parte tubular y la segunda parte tubular pueden estar completamente separadas entre sí. Alternativamente, sólo una o más partes de la primera parte tubular pueden estar separadas de las partes correspondientes de la segunda parte tubular. En esta última configuración, la fuente PIG puede comprender una conexión física entre una parte de la primera parte tubular y la segunda parte tubular. La conexión física puede permitir que las partículas que se aceleran fuera de la columna de plasma completen un primer giro al escapar de la columna de plasma sin entrar en la conexión física.

La fuente PIG puede pasar a través de un primer de que está conectado eléctricamente a tierra. Un segundo de que está conectado eléctricamente a una fuente de tensión alterna puede proporcionar la tensión en la región de aceleración.

5 El acelerador de partículas puede comprender una estructura que encierra, en esencia, la fuente PIG. El acelerador de partículas puede comprender yugos magnéticos que definen una cavidad que contiene la región de aceleración. Los yugos magnéticos pueden ser para generar un campo magnético a través de la región de aceleración. El campo magnético puede ser al menos 2 Tesla (T). Por ejemplo, el campo magnético puede ser al menos 10,5 T. La tensión puede comprender una tensión de radiofrecuencia (RF) que es inferior a 15 kV.

10 El acelerador de partículas puede comprender uno o más electrodos para el uso en la aceleración de las partículas fuera del acelerador de partículas. Al menos un cátodo puede utilizarse para generar la columna de plasma. El al menos un cátodo utilizado para generar la columna de plasma puede comprender un cátodo frío (por ejemplo, uno que no esté calentado por una fuente externa). Un circuito capacitivo puede acoplar al menos parte de la tensión al cátodo frío. El cátodo frío puede estar configurado para impulsar la tensión para generar la columna de plasma a partir del gas en la primera parte tubular y la segunda parte tubular.

15 Cualesquiera de las características anteriores pueden combinarse para formar las implementaciones no descritas específicamente en la presente memoria.

Los detalles de uno o más ejemplos se presentan en los dibujos adjuntos y en la descripción siguiente. Otras características, aspectos y ventajas resultarán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

Descripción de los dibujos

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

20 La Fig. 1B es una vista lateral en sección transversal del sincrociclotrón mostrado en la Fig. 1A.

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

La Fig. 3A es una vista lateral de una fuente de partículas, tal como una fuente de un manómetro de ionización Penning.

25 La Fig. 3B es una vista lateral en primer plano de una parte de la fuente de partículas de la Fig. 3A que pasa a través de una de de ensayo y adyacente a una de de RF.

La Fig. 4 es una vista lateral de la fuente de partículas de la Fig. 3 que muestra la aceleración en espiral de una partícula de una columna de plasma generada por la fuente de partículas.

La Fig. 5 es una vista en perspectiva de la fuente de partículas de la Fig. 4

30 La Fig. 6 es una vista en perspectiva de la fuente de partículas de la Fig. 4 que contiene un tope para bloquear una o más fases de partículas.

La Fig. 7 es una vista en perspectiva de un ejemplo alternativo que no forma parte de la invención en el que se ha eliminado una parte sustancial de la fuente de iones.

Descripción detallada

35 En la presente memoria se describe un sistema basado en sincrociclotrón. Sin embargo, los circuitos y métodos descritos en la presente memoria pueden utilizarse con cualquier tipo de ciclotrón o acelerador de partículas.

Haciendo referencia a las Fig. 1A y 1B, un sincrociclotrón 1 incluye bobinas eléctricas 2a y 2b alrededor de dos polos ferromagnéticos 4a y 4b separados, que están configurados para generar un campo magnético. Los polos magnéticos 4a y 4b están definidos por dos partes opuestas de los yugos 6a y 6b (mostradas en sección transversal). El espacio entre los polos 4a y 4b define la cámara de vacío 8 o puede instalarse una cámara de vacío separada entre los polos 4a y 4b. La intensidad del campo magnético es generalmente 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 geometría de las bobinas 2a y 2b y la forma y el material de los polos magnéticos 4a y 4b.

45 Los electrodos de aceleración se definen como de 10 y de 12, que tienen un espacio 13 entre ellos. El de 10 está conectado a un potencial de tensión alterna cuya frecuencia cambia de alta a baja durante un ciclo de aceleración para tener en cuenta la masa relativista creciente de una partícula cargada y el campo magnético decreciente radialmente (medido desde el centro de la cámara de vacío 8) producido por las bobinas 2a y 2b y las partes polo 4a y 4b. En consecuencia, el de 10 se denomina como el de de radiofrecuencia (RF). El perfil idealizado de neumático de la tensión alterna en los des 10 y 12 se muestra en la Fig. 2 y se explicará en detalle a continuación. En este ejemplo, el de 10 de RF es una estructura semicilíndrica que es hueca en el interior. El de 12, también denominado

"de de ensayo", no necesita ser una estructura cilíndrica hueca, puesto que está conectado a tierra en las paredes de la cámara de vacío 14. El de 12, según se muestra en las Fig. 1A y 1B, incluye una tira de metal, por ejemplo, cobre, que tiene una ranura conformada para coincidir con una, en esencia, ranura similar en el de 10 de RF. El de 12 puede conformarse para formar una imagen simétrica de la superficie 16 del de 10 de RF.

5 La fuente de iones 18 se encuentra aproximadamente en el centro de la cámara de vacío 8 y está configurada para proporcionar partículas (por ejemplo, protones) en un centro del sincrociclotrón para la aceleración, según se describe a continuación. Los electrodos de extracción 22 dirigen las partículas cargadas desde una región de aceleración hacia el canal de extracción 24, formando de este modo el haz 26 de las partículas cargadas. Aquí, la fuente de iones 18 está insertada axialmente en la región de aceleración.

10 Los des 10 y 12 y otras piezas de hardware incluidas en un sincrociclotrón definen un circuito resonante ajustable en virtud de una entrada de tensión oscilante que crea un campo eléctrico oscilante a través del espacio 13. El resultado es una cavidad resonante en la cámara de vacío 8. Esta frecuencia de resonancia de la cavidad resonante puede ajustarse para mantener su factor Q alto mediante la sincronización de la frecuencia que está siendo barrida. En un ejemplo, la frecuencia de resonancia de la cavidad resonante se mueve, o "barre", dentro de un intervalo de aproximadamente 30 Megahertzios (MHz) y aproximadamente 135 MHz (intervalo VHF) a lo largo del tiempo, por ejemplo, durante aproximadamente 1 milisegundo (ms). En otro ejemplo, la frecuencia de resonancia de la cavidad resonante se mueve, o barre, entre aproximadamente 95 MHz y aproximadamente 135 MHz en aproximadamente 1 ms.

20 La resonancia de la cavidad puede controlarse en la forma descrita en la solicitud de patente de U.S. nº 11/948.359, titulada "Correspondencia entre una frecuencia de resonancia de una cavidad resonante y una frecuencia de un voltaje de entrada".

El factor Q es una medida de la "calidad" de un sistema resonante en su respuesta a las frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia. En este ejemplo, el factor Q se define como

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

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

El mecanismo de ajuste puede ser, por ejemplo, una bobina de inductancia variable o una capacitancia variable. Un dispositivo de capacitancia variable puede ser una lámina vibrante o un condensador giratorio. En el ejemplo mostrado en las Fig. 1A y 1B, el mecanismo de ajuste incluye el condensador giratorio 28. El condensador giratorio 28 incluye palas giratorias 30 que son accionadas por un motor 31. Durante cada ciclo del motor 31, cuando las palas 30 se engranan con las palas 32, la capacitancia del circuito resonante que incluye los des 10 y 12 y el condensador giratorio 28 aumenta y la frecuencia de resonancia disminuye. El proceso se invierte cuando las palas se desprenden. Por lo tanto, la frecuencia de resonancia se cambia modificando la capacitancia del circuito resonante. Esto sirve para el fin de reducir, por un factor importante, la energía requerida para generar la alta tensión aplicada en el espacio de de de ensayo a la frecuencia necesaria para acelerar el haz de partículas. La forma de las palas 30 y 32 puede mecanizarse para crear la dependencia requerida de la frecuencia de resonancia en el tiempo.

La rotación de la pala puede sincronizarse con la generación de frecuencia de RF, de modo que la frecuencia del circuito resonante definida por el sincrociclotrón se mantenga cerca de la frecuencia del potencial de tensión alterna aplicado a la cavidad resonante. Esto promueve la transformación eficiente de la energía de RF aplicada a la tensión de RF en el de de RF.

Un sistema de bombeo de vacío 40 mantiene la cámara de vacío 8 a una presión muy baja para no dispersar el haz de aceleración (o para proporcionar relativamente poca dispersión) y para evitar, en esencia, descargas eléctricas del de de RF.

45 Para lograr la aceleración, en esencia, uniforme en el sincrociclotrón, la frecuencia y la amplitud del campo eléctrico a través del espacio de se modifica para tener en cuenta el aumento de la masa relativista y la variación radial del campo magnético, así como para mantener el enfoque del haz de partículas. La variación radial del campo magnético se mide como una distancia desde el centro de una trayectoria en espiral hacia afuera de una partícula cargada.

La Fig. 2 es una ilustración de una forma de onda idealizada que puede ser necesaria para acelerar partículas cargadas en un sincrociclotrón. Muestra sólo unos pocos ciclos de la forma de onda y no representa necesariamente los perfiles de modulación de frecuencia y amplitud ideales. La Fig. 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 la masa relativista de la partícula aumenta mientras que la velocidad de la partícula se aproxima a una fracción significativa de la velocidad de la luz.

55 La fuente de iones 18 se despliega cerca del centro magnético del sincrociclotrón 1, de modo que las partículas están presentes en el plano medio del sincrociclotrón, donde pueden ser objeto del campo de RF (tensión). La

fuelle de iones puede tener una geometría de un manómetro de ionización Penning (PIG). En la geometría PIG, dos cátodos de alto voltaje se colocan aproximadamente uno frente al otro. Por ejemplo, un cátodo puede estar en un lado de la región de aceleración y un cátodo puede estar en el otro lado de la región de aceleración y en línea con las líneas del campo magnético. Las envolventes 12 de los des de ensayo del conjunto fuente pueden estar al potencial de tierra. El ánodo incluye un tubo que se extiende hacia la región de aceleración. Cuando una cantidad relativamente pequeña de un gas (por ejemplo, hidrógeno/H₂) ocupa una región en el tubo entre los cátodos, una columna de plasma puede formarse a partir del gas mediante la aplicación de una tensión a los cátodos. La tensión aplicada provoca que los electrones fluyan a lo largo de las líneas del campo magnético, esencialmente paralelas a las paredes del tubo, y que se ionicen las moléculas del gas que se concentran dentro del tubo, creando así la columna de plasma.

Una geometría de un manómetro de ionización 18 (PIG), para su uso en el sincrociclotrón 1, se muestra en las Fig. 3A y 3B. Haciendo referencia a la Fig. 3A, la fuente de iones 18 incluye un lado emisor 38a que contiene una alimentación de gas 39 para recibir el gas y un lado reflector 38b. Una envolvente o tubo 44 contiene el gas, según se describe a continuación. La Fig. 3B, muestra la fuente de iones 18 que pasa a través del de de ensayo 12 y adyacente al de de RF 10. En funcionamiento, el campo magnético entre el de de RF 10 y el de de ensayo 12 provoca que las partículas (por ejemplo, protones) se aceleren hacia afuera. La aceleración es en espiral alrededor de la columna de plasma, con el radio de la partícula a la columna de plasma que aumenta progresivamente. La aceleración en espiral, marcada 43, se representa en las Fig. 5 y 6. Los radios de curvatura de las espirales dependen de la masa de una partícula, la energía impartida a la partícula por el campo de RF y una intensidad del campo magnético.

Cuando el campo magnético es alto, puede llegar a ser difícil impartir suficiente energía a una partícula de manera que tenga un radio de curvatura lo suficiente grande como para salvar la envolvente física de la fuente de iones en su(s) giro(s) inicial(es) durante la aceleración. El campo magnético es relativamente alto en la región de la fuente de iones, por ejemplo, del orden de 2 Tesla (T) o más (por ejemplo, 8 T, 8,8 T, 8,9 T, 9 T, 10,5 T o más). Como resultado de este campo magnético relativamente alto, el radio inicial de la partícula a la fuente de iones es relativamente pequeño para las partículas de baja energía, donde las partículas de baja energía incluyen las partículas que se extraen primero de la columna de plasma. Por ejemplo, un radio de este tipo puede ser del orden de 1 mm. Debido a que los radios son tan pequeños, al menos inicialmente, algunas partículas pueden entrar en contacto con el área de la envolvente de la fuente de iones, evitando con ello una mayor aceleración hacia fuera de dichas partículas. En consecuencia, la envolvente de la fuente de iones 18 se interrumpe o se separa para formar dos partes, como se muestra en la Fig. 3B. Es decir, una parte de la envolvente de la fuente de iones se elimina en la región de aceleración 41, por ejemplo, aproximadamente en el punto en donde las partículas deben ser extraídas de la fuente de iones. Esta interrupción está marcada 45 en la Fig. 3B. La envolvente también se puede retirar para distancias por encima y por debajo de la región de aceleración. La totalidad o una parte del de de ensayo 12 en la región de aceleración puede o no puede eliminarse también.

En el ejemplo de las Fig. 3A y 3B, la carcasa 44 incluye un tubo que contiene una columna de plasma que contiene partículas que se aceleran. El tubo puede tener diferentes diámetros en diferentes puntos, como se muestra. El tubo puede residir dentro del de de ensayo 12, aunque esto no es necesario. Una parte del tubo por aproximadamente un plano medio del sincrociclotrón se elimina completamente, dando como resultado una envolvente compuesta por dos partes separadas con una interrupción 45 entre las partes. En este ejemplo, la interrupción es de aproximadamente 1 milímetro (mm) a 3 mm (es decir, aproximadamente 1 mm a 3 mm del tubo se retira). La cantidad de tubo que se retira puede ser suficientemente significativa para permitir la aceleración de partículas de la columna de plasma, pero lo suficientemente pequeña como para impedir una disipación significativa de la columna de plasma en la parte interrumpida.

Mediante la eliminación de la estructura física, aquí el tubo, en la región de aceleración de partículas, las partículas pueden hacer giro(s) inicial(es) en relativamente pequeños radios de - por ejemplo, en presencia de campos magnéticos relativamente altos - sin entrar en contacto con estructuras físicas que impidan aceleración adicional. El(los) giro(s) inicial(es) puede(n) incluso cruzar de nuevo a través de la columna de plasma, dependiendo de la intensidad de los campos magnético y RF.

El tubo puede tener un diámetro interior relativamente pequeño, por ejemplo, aproximadamente 2 mm. Esto conduce a una columna de plasma que es también relativamente estrecha y, por tanto, proporciona un conjunto relativamente pequeño de posiciones radiales de origen en las que las partículas pueden comenzar a acelerarse. El tubo está también suficientemente alejado de los cátodos 46 utilizados para producir la columna de plasma - en este ejemplo, aproximadamente 10 mm desde cada cátodo. Estas dos características, combinadas, reducen la cantidad de gas hidrógeno (H₂) que fluye en el sincrociclotrón a menos de 1 centímetro cúbico estándar por minuto (SCCM), permitiendo de este modo que el sincrociclotrón funcione con relativamente pequeñas aberturas de conductancia de vacío en la RF del sincrociclotrón/cavidad del haz y sistemas de bomba de vacío de capacidad relativamente pequeña, por ejemplo, aproximadamente 500 litros por segundo.

La interrupción del tubo también es compatible con una mayor penetración del campo de RF en la columna de plasma. Es decir, puesto que no hay estructura física presente en la interrupción, el campo de RF puede alcanzar fácilmente la columna de plasma. Además, la interrupción en el tubo permite acelerar las partículas de la columna de

plasma utilizando diferentes campos de RF. Por ejemplo, pueden utilizarse campos de RF más bajos para acelerar las partículas. Esto puede reducir los requisitos de energía de los sistemas utilizados para generar el campo de RF. En un ejemplo, un sistema de RF de 20 kilovatios (kw) genera un campo de RF de 15 kilovoltios (kV) para acelerar las partículas de la columna de plasma. La utilización de campos de RF más bajos reduce los requisitos de enfriamiento del sistema de RF y los requisitos de separación de la tensión de RF. En el sincrociclotrón aquí descrito, se extrae un haz de partículas utilizando un sistema de extracción resonante. Es decir, la amplitud de las oscilaciones radiales del haz se incrementa por una perturbación magnética dentro del acelerador, que está en resonancia con estas oscilaciones. Cuando se utiliza un sistema de extracción resonante, se mejora la eficiencia de extracción limitando la extensión del espacio de fase del haz interno. Con atención al diseño de las estructuras generadoras del campo magnético y de RF, la extensión del espacio de fase del haz en la extracción está determinada por la extensión del espacio de fase al comienzo de la aceleración (por ejemplo, a la aparición de la fuente de iones). Como resultado, se puede perder relativamente poco haz en la entrada del canal de extracción y se puede reducir la radiación de fondo del acelerador.

Una estructura física, o tope, se puede proporcionar para controlar la fase de las partículas que se les permite escapar de la región central del sincrociclotrón. Un ejemplo de un tope 51 de este tipo se muestra en la Fig. 6. El tope 51 actúa como un obstáculo que bloquea las partículas que tienen ciertas fases. Es decir, se evita que las partículas que golpean el tope se aceleren aún más, mientras que las partículas que pasan el tope continúan su aceleración fuera del sincrociclotrón. Un tope puede estar cerca de la columna de plasma, como se muestra en la Fig. 6, con el fin de seleccionar fases durante el(los) giro(s) inicial(es) de las partículas donde la energía de las partículas es baja, por ejemplo, inferior a 50 kV. Alternativamente, un tope puede estar situado en cualquier otro punto relativo a la columna de plasma. En el ejemplo mostrado en la Fig. 6, se sitúa un único tope en la de de ensayo 12. Sin embargo, puede haber más de un tope (no representado) por de.

Los cátodos 46 pueden ser cátodos "fríos". Un cátodo frío puede ser un cátodo que no es calentado por una fuente de calor externa. Además, los cátodos pueden ser pulsados, lo que significa que emiten la(s) ráfaga(s) de señal periódicamente en lugar de continuamente. Cuando los cátodos son fríos y son pulsados, los cátodos están menos sujetos a desgaste y por lo tanto pueden durar relativamente largo tiempo. Además, pulsar los cátodos puede eliminar la necesidad de refrigerar por agua los cátodos. En una implementación, los cátodos 46 pulsan a una tensión relativamente alta, por ejemplo, de aproximadamente 1 kV a aproximadamente 4 kV, y un cátodo de picos moderados descarga corrientes desde aproximadamente 50mA hasta aproximadamente 200mA en un ciclo de trabajo entre aproximadamente 0,1% y aproximadamente 1% o 2% con tasas de repetición entre aproximadamente 200Hz a aproximadamente 1KHz.

Los cátodos fríos a veces pueden causar un salto temporal y retardo del encendido. Es decir, la falta de suficiente calor en los cátodos puede afectar el tiempo en el que los electrones se descargan en respuesta a una tensión aplicada. Por ejemplo, cuando los cátodos no están suficientemente calientes, la descarga puede ocurrir varios microsegundos más tarde, o más, de lo esperado. Esto puede afectar a la formación de la columna de plasma y, por tanto, al funcionamiento del acelerador de partículas. Para contrarrestar estos efectos, la tensión del campo de RF en la cavidad 8 puede acoplarse a los cátodos. Los cátodos 46 están alojados de otro modo en un metal, que forma un escudo de Faraday para proteger, en esencia, los cátodos del campo de RF. En una implementación, una parte de la energía de RF se puede acoplar a los cátodos del campo de RF, por ejemplo, se pueden acoplar aproximadamente 100 V a los cátodos del campo de RF. La Fig. 3B muestra una implementación, en la que un circuito capacitivo 54, en este caso un condensador, se carga por el campo de RF y proporciona tensión a un cátodo 46. Se puede usar un inductor de RF y una alimentación de CC para cargar el condensador. Puede implementarse una disposición correspondiente (no mostrada) para el otro cátodo 46. La tensión de RF acoplada puede reducir el salto de tiempo y reducir el retardo de descarga a aproximadamente 100 nanosegundos (ns) o menos en algunas implementaciones.

Un ejemplo alternativo que no forma parte de la invención se muestra en la Fig. 7. En este ejemplo, una parte sustancial, pero no toda la envolvente de la fuente PIG se retira, dejando el haz de plasma parcialmente expuesto. Por lo tanto, partes de la envolvente PIG se separan de sus partes complementarias, pero no hay separación completa como fue el caso anterior. La parte 61 que permanece físicamente conecta a la primera parte tubular 62 y la segunda parte tubular 63 de la fuente PIG. En este ejemplo, se retira suficiente de la envolvente para permitir que las partículas realicen al menos un giro (órbita) sin afectar la parte 61 de la envolvente que queda. En un ejemplo, el primer radio de giro puede ser de 1 mm, aunque se pueden implementar otros radios de giro. El ejemplo mostrado en la Fig. 7 puede combinarse con cualquiera de las otras características descritas en la presente memoria.

La fuente de partículas y las características que se acompañan descritas en la presente memoria no se limitan a utilizar con un sincrociclotrón, sino que se pueden utilizar con cualquier tipo de acelerador de partículas o ciclotrón. Además, se pueden usar fuentes de iones distintas de las que tienen una geometría PIG con cualquier tipo de acelerador de partículas y pueden tener partes interrumpidas, cátodos fríos, topes y/o cualesquiera de las otras características descritas en la presente memoria.

Los componentes de las diferentes implementaciones descritas en la presente memoria se pueden combinar para formar otros ejemplos no presentados específicamente anteriormente. El conjunto de reivindicaciones adjunto define y limita la invención relacionada con la presente descripción.

REIVINDICACIONES

1. Un sincrociclotrón que comprende:
una cavidad (8) que contiene una región de aceleración;
estructuras magnéticas (6a, 6b) para proporcionar un campo magnético a dicha cavidad (8);
- 5 una fuente de partículas (18) para proporcionar una columna de plasma a dicha cavidad, teniendo dicha fuente de partículas una envolvente (44) para contener la columna de plasma, estando interrumpida dicha envolvente (44) en la región de aceleración para exponer dicha columna de plasma,
en donde dicha envolvente (44) comprende dos partes que están completamente separadas de manera que dicha envolvente (44) está completamente separada en dicha región de aceleración; y
- 10 una fuente de tensión para proporcionar una tensión de radiofrecuencia (RF) a dicha cavidad (8) para acelerar las partículas de dicha columna de plasma en dicha región de aceleración.
2. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, en donde dicho campo magnético es superior a 2 Tesla (T), y dicho sincrociclotrón está configurado para acelerar dichas partículas de la columna de plasma hacia el exterior en espirales con radios que aumentan progresivamente.
- 15 3. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, en donde dicha fuente de tensión comprende un primer de (10) que está conectado eléctricamente a una tensión alterna y un segundo de (12) que está conectado eléctricamente a tierra; y en donde al menos parte de dicha fuente de partículas (18) pasa a través de dicho segundo de (12).
4. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, que comprende además un tope (51) en dicha región de aceleración, dicho tope (51) para bloquear la aceleración de al menos algunas de dichas partículas de dicha columna de plasma.
- 20 5. El sincrociclotrón de la reivindicación 4, en donde dicho tope (51) es, en esencia, ortogonal a dicha región de aceleración y está configurado para bloquear ciertas fases de las partículas de dicha columna de plasma.
6. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, que comprende además:
cátodos (46) para utilizar en generar dicha columna de plasma, haciéndose funcionar dichos cátodos (46) para impulsar una tensión para ionizar el gas para generar dicha columna de plasma;
- 25 en donde dichos cátodos (46) no son calentados por una fuente de calor externa.
7. El sincrociclotrón de la reivindicación 6, en donde dichos cátodos (46) están configurados para impulsar a tensiones entre aproximadamente 1 kV a aproximadamente 4 kV.
8. El sincrociclotrón de la reivindicación 6, que comprende además:
un circuito (54) para acoplar la tensión de dicha tensión de RF al al menos uno de dichos cátodos.
- 30 9. El sincrociclotrón de la reivindicación 8, en donde dicho circuito (54) comprende un circuito capacitivo.
10. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, en donde dichas estructuras magnéticas (6a, 6b) comprenden yugos magnéticos, en donde dicha fuente de tensión comprende un primer de (10) que está conectado eléctricamente a una tensión alterna y un segundo de (12) que está eléctricamente conectado a tierra, en donde dicho primer de (10) y dicho segundo de (12) forman un circuito resonante ajustable y en donde dicha cavidad (8) comprende una
- 35 cavidad resonante que contiene dicho circuito resonante ajustable.
11. El sincrociclotrón de la reivindicación 8, en donde dichos cátodos (46) comprenden:
un primer cátodo adyacente a un primer extremo de dicha envolvente (44); y
un segundo cátodo adyacente a un segundo extremo de dicha envolvente (44), dichos cátodos primero y segundo configurados para aplicar tensión a dicha envolvente (44) para formar dicha columna de plasma de dicho gas;
- 40 en donde las partículas están disponibles para ser extraídas de dicha columna de plasma para la aceleración.
12. El sincrociclotrón de la reivindicación 11, en donde dicho primer cátodo está en un lado diferente de dicha región de aceleración que dicho segundo cátodo.
13. El sincrociclotrón de la reivindicación 1,

en donde dichas estructuras magnéticas (6a, 6b) comprenden yugos magnéticos para proporcionar dicho campo magnético que atraviesa dicha región de aceleración, siendo mayor dicho campo magnético de aproximadamente 2 Tesla (T).

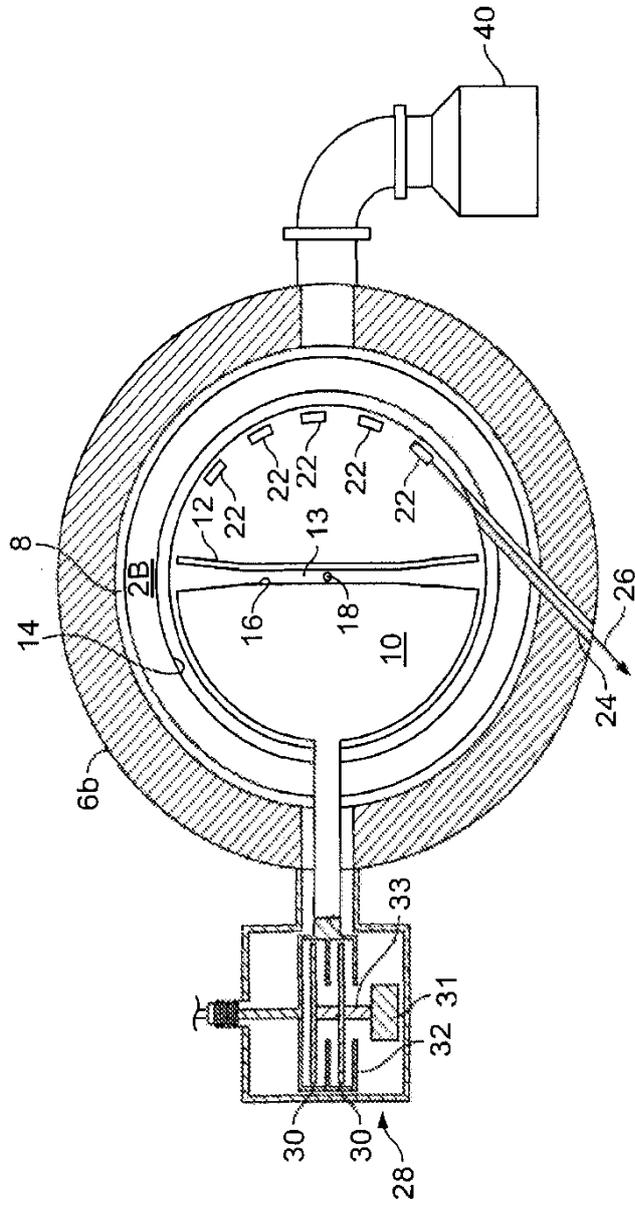


FIG. 1A

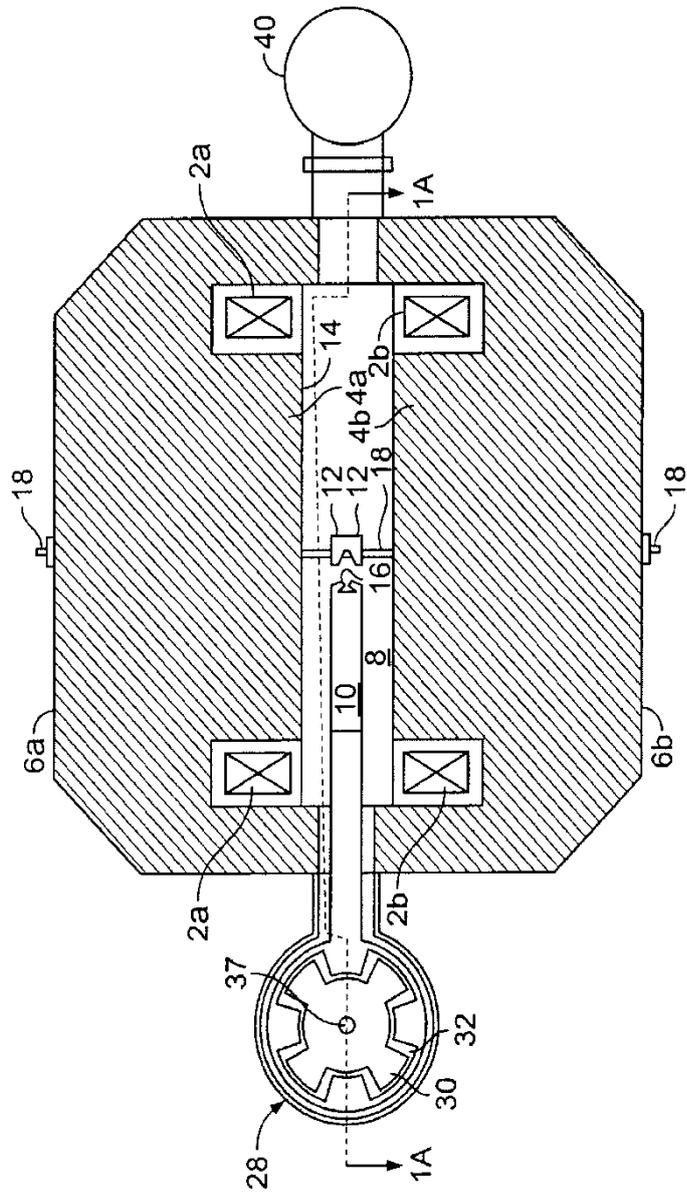


FIG. 1B

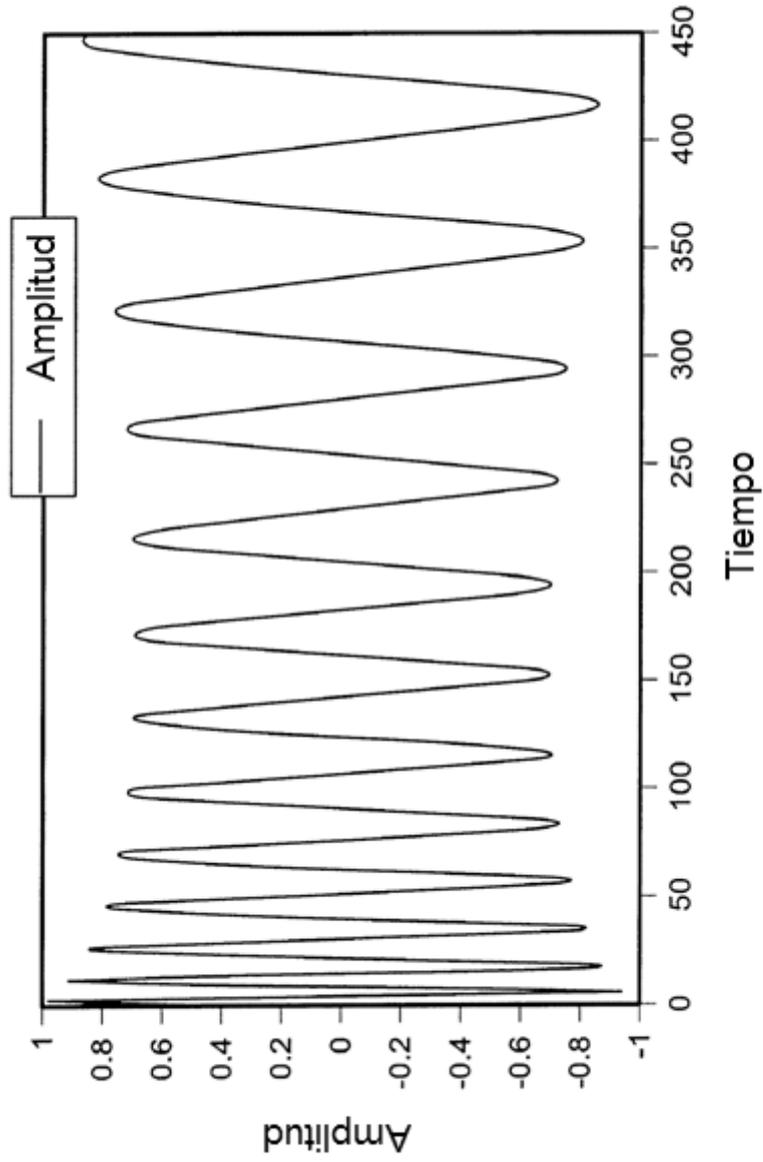


FIG. 2

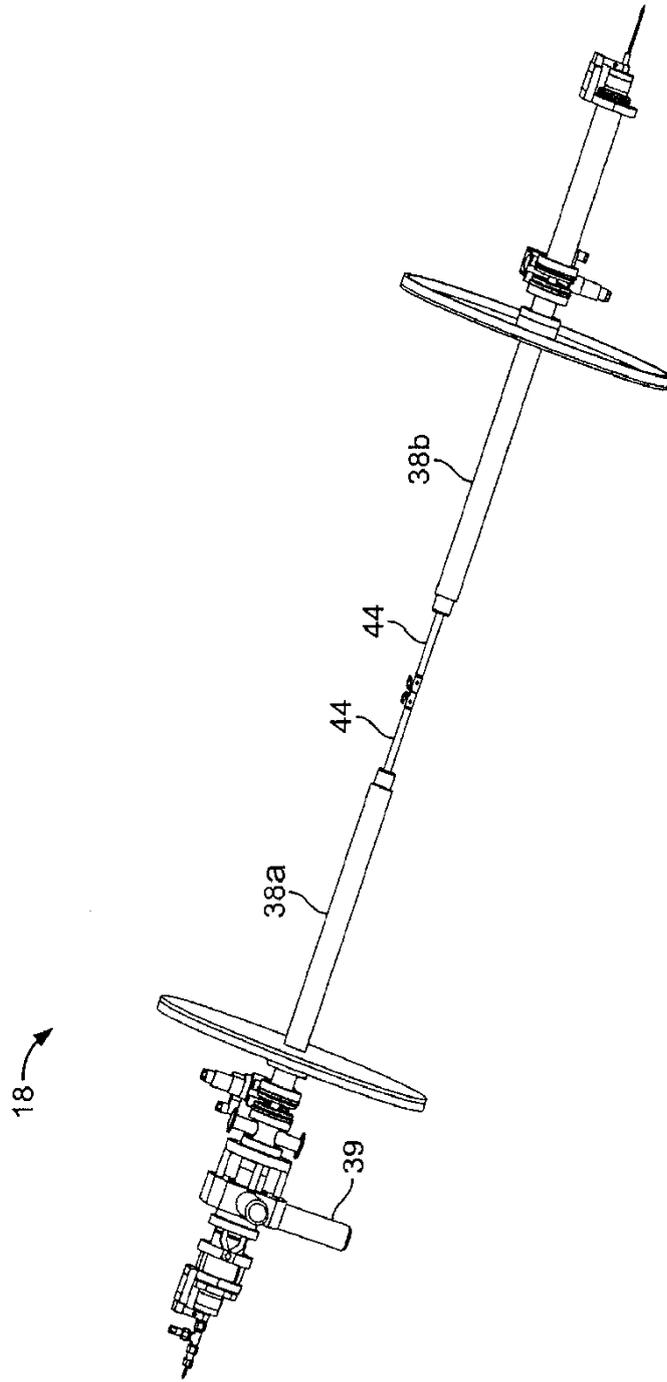


FIG. 3A

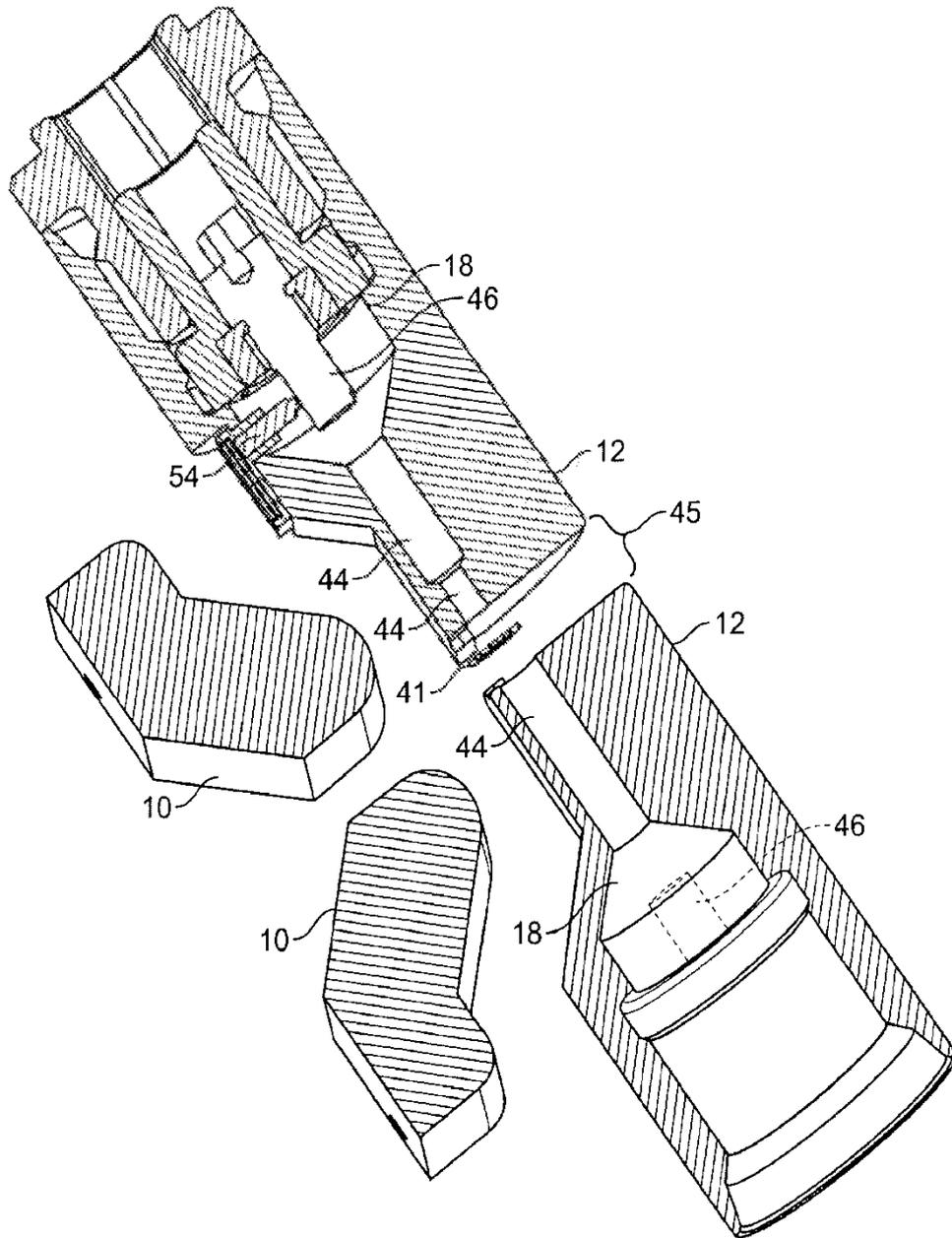


FIG. 3B

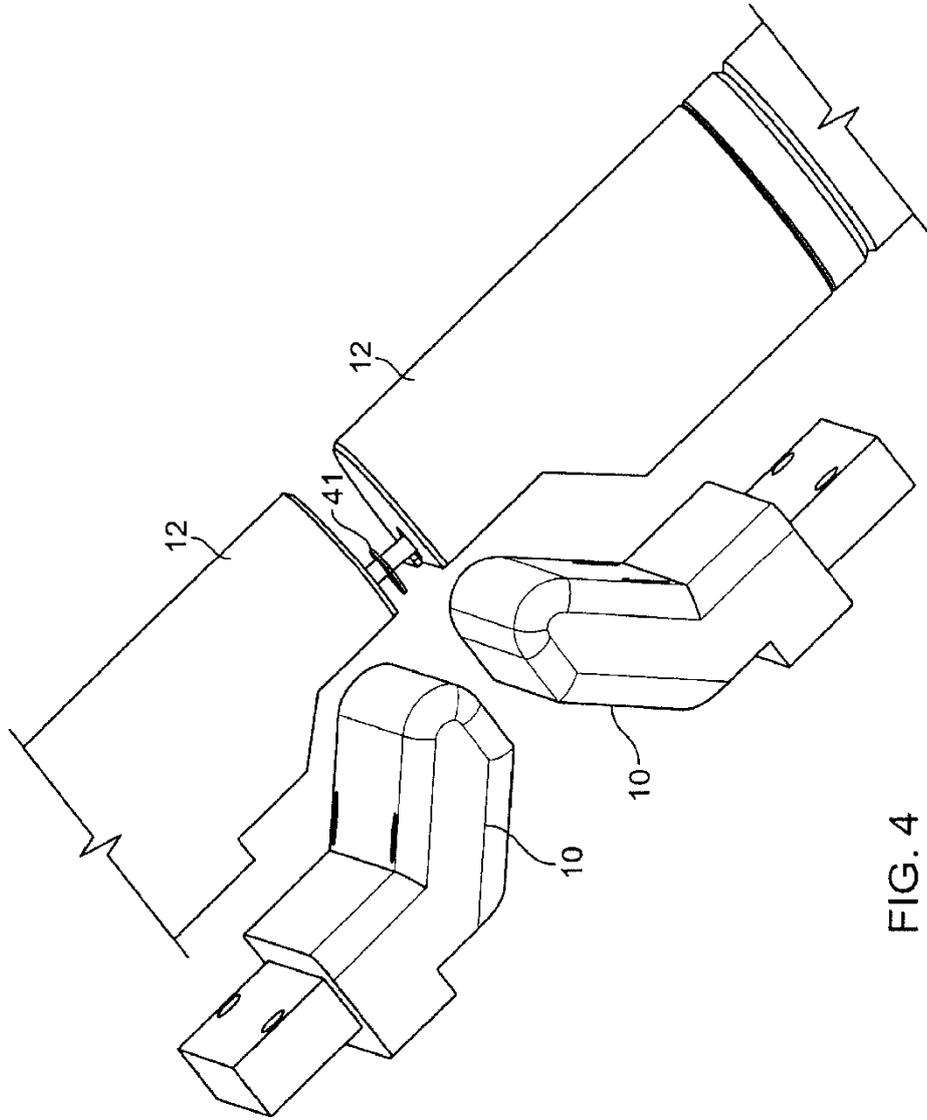


FIG. 4

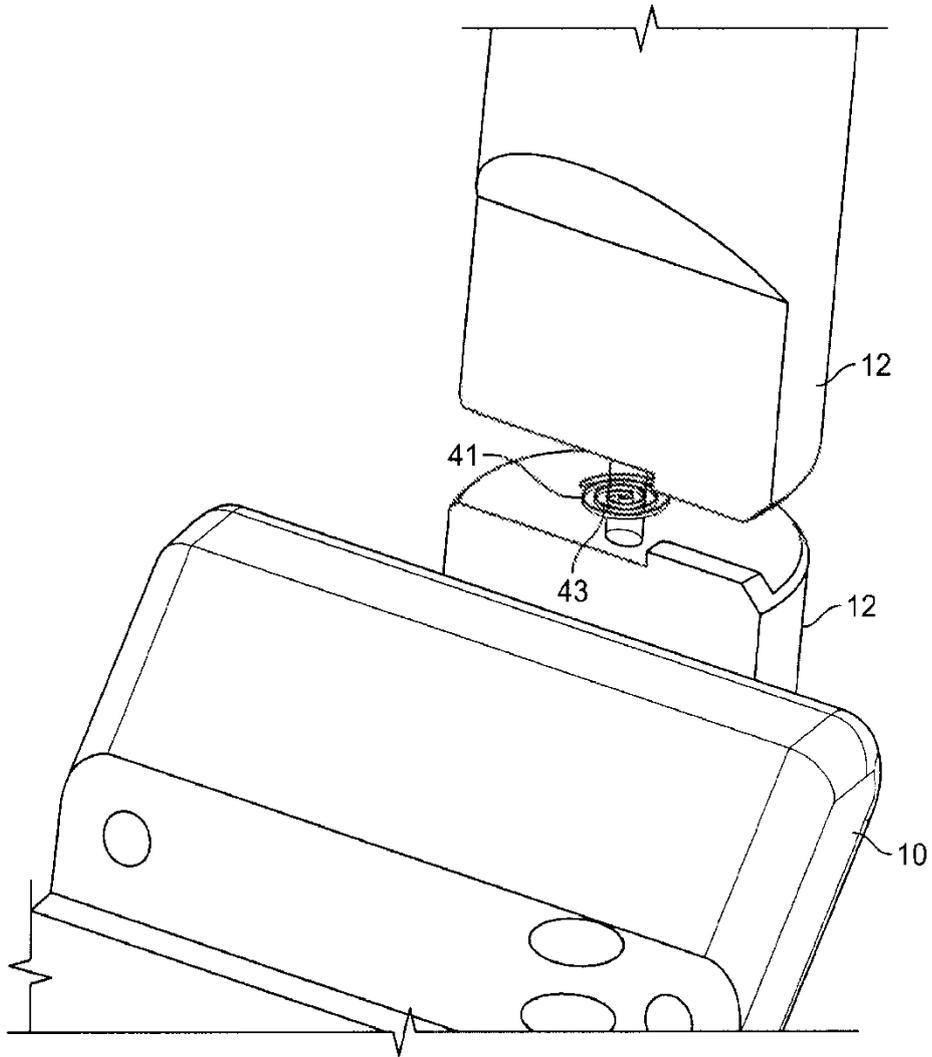


FIG. 5

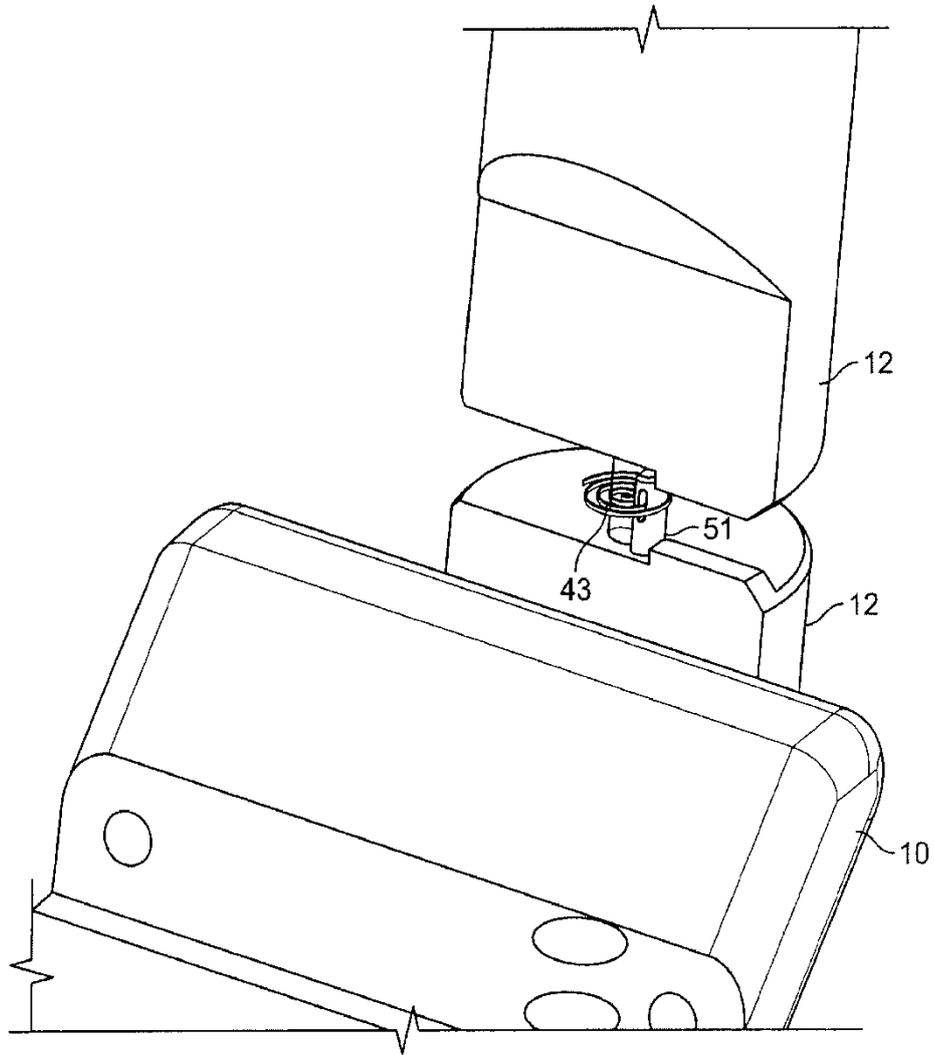


FIG. 6

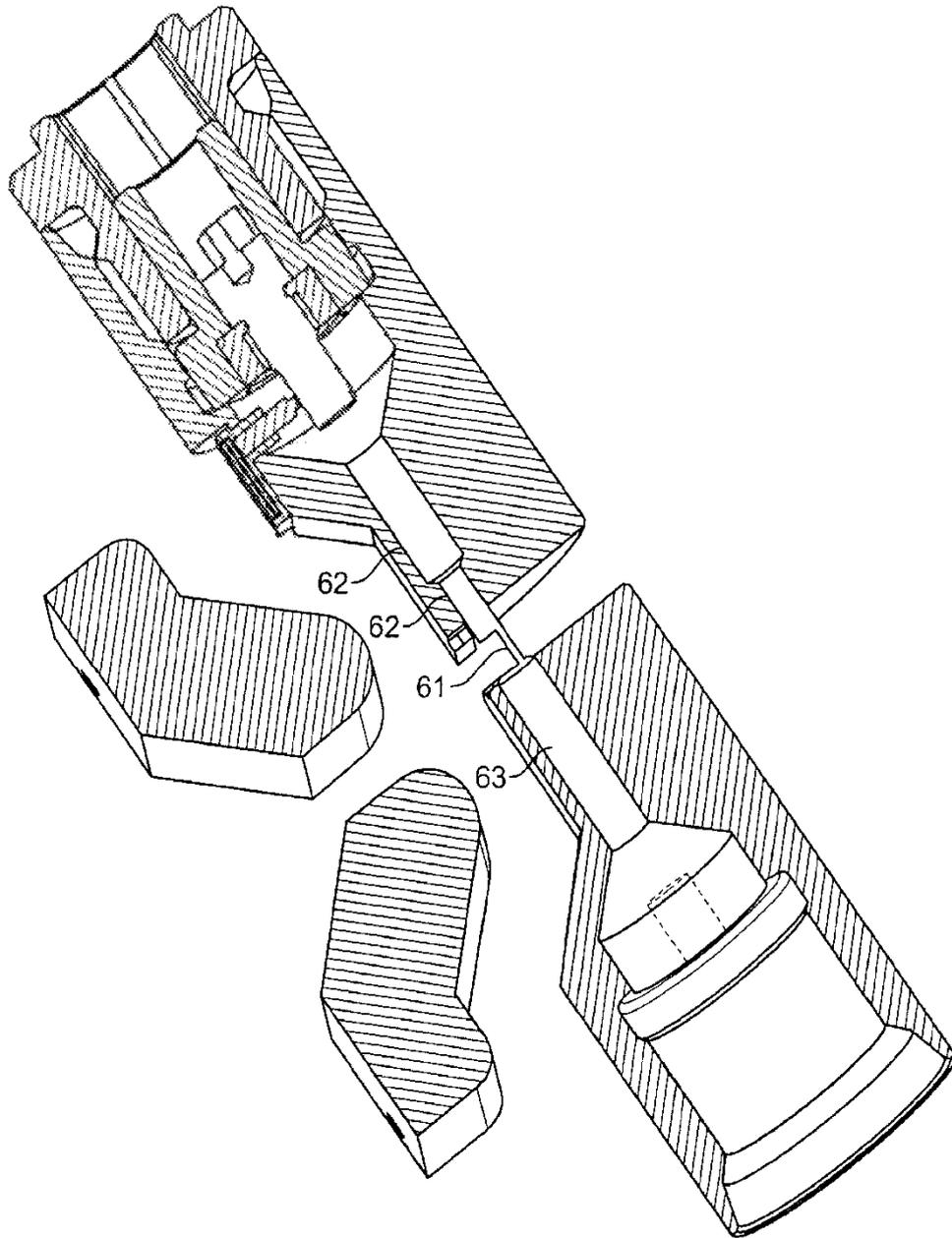


FIG. 7