

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 014 992**

51 Int. Cl.:

H01J 27/18 (2006.01)

H05H 7/08 (2006.01)

H05H 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.07.2019 PCT/ES2019/070461**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.01.2020 WO20012047**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.07.2019 E 19834900 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.12.2024 EP 3799104**

54 Título: **Fuente de iones interna para ciclotrones de baja erosión**

30 Prioridad:

10.07.2018 ES 201830684

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.04.2025

73 Titular/es:

**CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS
MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS
(CIEMAT) (100.00%)
Avda Complutense 40
28040 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

VARELA ALONSO, RODRIGO

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 3 014 992 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 iones interna para ciclotrones de baja erosión

5 Campo de la invención

La presente invención entra dentro en el campo de las fuentes de iones para aceleradores de partículas.

Antecedentes de la invención

10

Una fuente de iones es el componente de los aceleradores de partículas donde el gas se ioniza transformándose en plasma, del cual luego se extraen las partículas cargadas para ser aceleradas. Las fuentes de iones se usan principalmente como fuentes internas en ciclotrones para producción de iones positivos ligeros e hidrógeno negativo. Este tipo de máquinas ha encontrado tradicionalmente su uso en el mundo de la investigación como máquinas de haz multipropósito de uso en múltiples campos. Recientemente se han venido usando para síntesis de radioisótopos en aplicaciones de radiofarmacia, así como en máquinas de protón/hadronterapia para el tratamiento de tumores.

15

20

Las fuentes de iones han estado tradicionalmente muy presentes en el mundo de la investigación en diferentes campos, desde su uso en aceleradores de partículas como el estudio de materiales o la estructura de la materia. Para la generación de iones se parte del material que desea ionizarse (generalmente un gas) y se le arrancan o añaden electrones a sus átomos por medio de uno o varios de los siguientes procesos: impacto de electrones (ionización directa y/o intercambio de carga), fotoionización e ionización en superficie.

25

En su esquema más simple, una fuente de iones se compone de una cámara principal donde se realiza el proceso, material para ionizar (introducido previamente o de manera continua), una fuente de energía para ionización y un sistema de extracción. De acuerdo con el proceso seguido, se puede hacer una clasificación general de los distintos tipos de fuentes de iones:

30

- Bombardeo de electrones: emplean electrones acelerados, típicamente generados en un cátodo a cierta temperatura, que impactan con el material e ionizan los átomos y/o moléculas de éste.

35

- Descarga de plasma DC/pulsada: son similares a las anteriores en cuanto a que emplean un haz de electrones generados por un cátodo, pero en este caso las presiones a las que operan son superiores. Por esta razón, se genera un plasma que los electrones rápidos se encargan de mantener depositando energía en forma de colisiones. En esta categoría se encuentran las fuentes de tipo Plasmatrón, Duoplasmatrón, Magnetrón y Penning. Generalmente emplean campos magnéticos para confinar las trayectorias de los electrones rápidos e incrementar la ionización. El inconveniente que presentan estas fuentes es la erosión en el cátodo debido a la elevada diferencia de potencial a la que se encuentra el cátodo, necesaria para acelerar los electrones, lo que provoca que los iones se vean acelerados en sentido opuesto e impacten contra el cátodo, arrancando material (pulverización catódica (*sputtering*)) y limitando la vida de dicho cátodo.

40

- Descarga de radiofrecuencia: son una evolución de las fuentes DC porque emplean un campo eléctrico alterno para acelerar los electrones en vez de uno continuo. Existen dos tipos de ellas dependiendo de cómo se genere el plasma y el campo eléctrico: las descargas de acoplo capacitivo (CCP) y las descargas de acoplo inducido (ICP). A bajas frecuencias siguen produciendo pulverización catódica en los "cátodos" debido a un potencial elevado entre el plasma y el medio metálico; pero a frecuencias elevadas dicho potencial disminuye por debajo de cierto umbral y la pulverización catódica es prácticamente inexistente, aumentando apreciablemente la vida de dichos "cátodos".

45

- Resonancia Ciclotrónica de Electrones (ECR/ECRIS): un diseño particular de descarga de radiofrecuencia, ya que se basa en excitar la resonancia ciclotrónica de los electrones situados en un campo magnético con una onda con la polarización circular adecuada, lo que provoca una absorción de la energía del campo electromagnético muy eficiente en las zonas de resonancia que da como resultado una elevada ionización.

50

- Láser: el método empleado en las fuentes de iones de láser es la fotoionización mediante varios láseres de alta potencia cuya longitud de onda esté sintonizada a distintas transiciones electrónicas logrando una excitación sucesiva de los electrones del átomo que se desea ionizar.

55

- Ionización de superficie: el método de producción de iones es el calentamiento de un material de alta función de trabajo y la inyección del material que desea ionizarse.

- Intercambio de carga: este tipo de fuente emplea un vapor de un metal con un ratio alto de cesión de electrones a través del cual hace pasar iones del átomo deseado para que se cargue negativamente.

60

En el caso de fuentes de iones internas para ciclotrones, el campo de preferente aplicación para la presente invención, debido a la configuración interna de los ciclotrones, con muy poco espacio disponible para acoplar internamente las fuentes de iones y un campo magnético muy alto en la dirección vertical que atrapa las trayectorias de los electrones y no los deja moverse libremente, las únicas fuentes internas que se han usado hasta ahora para ciclotrones son las de tipo Penning. Las fuentes de iones con configuración tipo Penning tienen dos cátodos colocados en los extremos verticales y un tubo hueco paralelo al campo magnético que los envuelve. Dichos cátodos pueden estar calentados externamente o permanecer inicialmente fríos y calentarse con el bombardeo

65

iónico de la descarga. Debido a la configuración simétrica de los cátodos y al campo magnético los electrones son emitidos y acelerados, desplazándose en trayectorias helicoidales que incrementan la ionización, y al llegar al extremo opuesto son reflejados debido al campo eléctrico. El resultado de las colisiones de los electrones rápidos con el gas inyectado es la creación de un plasma del que se pueden extraer tanto iones positivos como iones negativos. Las fuentes de iones tipo Penning tiene el inconveniente de la pulverización catódica de los cátodos, que a pesar de ser comúnmente de materiales de elevada resistencia y alta emisión de electrones (como el tántalo), se ven sometidos a un desgaste excesivo que hace necesario su frecuente reemplazo.

Las fuentes de iones tipo Penning son muy sencillas y compactas, empleando una descarga DC. El uso de una fuente externa añade mucha complejidad al sistema a pesar de que posibilita el uso de otros métodos para generar el plasma, por lo que los fabricantes no suelen incluirlas en sus ciclotrones comerciales. El problema que presentan todas las fuentes que usan descargas DC es que ese tipo de descarga erosiona los cátodos mientras el plasma está activo, por lo que hay que cambiarlos periódicamente y en estas máquinas que se usan para aplicaciones médicas generalmente es deseable tenerla funcionando el mayor tiempo posible sin interrupciones. Además, en el caso de la producción de H⁺, los electrones de alta energía de la descarga DC son las partículas que más contribuyen a la destrucción del H⁺, de manera que se reduce la corriente extraída.

El documento de patente US3778656-A describe un fuente de iones que emplea una cavidad resonante de microondas que se excita en uno de sus modos de resonancia y un campo magnético estático ajustado a la resonancia ciclotrónica de electrones.

Por tanto, se hace necesario disponer de una fuente de iones interna para ciclotrones que resuelva dichos inconvenientes.

Descripción de la invención

La presente invención se refiere a una fuente de iones de radiofrecuencia de baja erosión, especialmente útil para ser usada como una fuente de iones interna para ciclotrones.

La fuente de iones comprende:

- un cuerpo hueco cuyas paredes interiores definen una cavidad cilíndrica. El cuerpo dispone de una entrada de suministro de gases por la que se introduce en la cavidad un gas para formación de plasma. El cuerpo dispone de una entrada de suministro de potencia a través de la cual se inyecta energía de radiofrecuencia en la cavidad. Las paredes interiores del cuerpo son conductoras eléctricas (preferentemente, todo el cuerpo es conductor).
- una cámara de expansión conectada a la cavidad a través de un orificio de salida de plasma realizado en el cuerpo.
- una rendija de extracción de iones en contacto con la cámara de expansión.
- un conductor coaxial ubicado en la cavidad del cuerpo, dispuesto paralelo al eje longitudinal de la cavidad.

Al menos uno de los extremos del conductor coaxial está en contacto con al menos una pared interior circular del cuerpo, formando una cavidad resonante coaxial. El conductor coaxial dispone de una protuberancia conductora que se extiende en el interior de la cavidad en dirección radial. La protuberancia conductora está enfrentada al orificio de salida de plasma.

En una realización, la fuente de iones comprende una pieza móvil introducida parcialmente en la cavidad en dirección radial a través de una abertura realizada en el cuerpo para realizar un ajuste fino de la frecuencia de la cavidad resonante. La pieza móvil es preferentemente de material conductor o de material dieléctrico.

El suministro de energía de radiofrecuencia se realiza a través de un acoplo capacitivo o un acople inductivo. El acople capacitivo se realiza mediante una guía de onda coaxial cuyo conductor interior está introducido parcialmente en la cavidad a través de la entrada de suministro de potencia. El acople inductivo se realiza mediante una espira que cortocircuita una pared interior del cuerpo con un conductor interior de una guía de onda coaxial introducida a través de la entrada de suministro de potencia.

En una realización un primer extremo del conductor coaxial está en contacto con una pared interior circular del cuerpo, estando el segundo extremo del conductor coaxial libre. En esta realización la protuberancia conductora está preferentemente ubicada en el segundo extremo del conductor coaxial. La cámara de expansión es preferentemente cilíndrica y está dispuesta de forma que su eje longitudinal es perpendicular al eje longitudinal de la cavidad. Alternativamente, la cámara de expansión puede estar dispuesta de forma que su eje longitudinal es paralelo al eje longitudinal de la cavidad.

En otra realización, los dos extremos del conductor coaxial están respectivamente en contacto con las dos paredes interiores circulares del cuerpo. En esta realización la protuberancia conductora está preferentemente ubicada en la parte central del conductor coaxial.

La fuente de iones puede ser de doble cavidad, comprendiendo un segundo cuerpo y un segundo conductor que

forman una segunda cavidad resonante coaxial. Las cavidades de ambos cuerpos están conectadas entre sí a través de una cámara de expansión común.

5 La fuente de iones de la presente invención permite resolver los inconvenientes de las fuentes de iones internas tipo Penning utilizados en los ciclotrones, en las cuales el plasma se genera produciendo erosión en los materiales conductores. La erosión se produce porque el plasma está cargado positivamente, de manera que los electrones se ven atraídos por el plasma, mientras que los iones positivos son rechazados y se ven acelerados por la diferencia de potencial entre el plasma y la pared, de forma que si la energía de los iones en el momento de la colisión con la pared es lo suficientemente elevada ($\gg 1$ eV) en el choque del ión con el material conductor se ven arrancados átomos del material. La cantidad de átomos arrancados depende del material conductor.

15 En la fuente de iones propuesta el plasma se genera sin producir erosión en los materiales conductores (es decir, los electrodos) empleados en la fuente de iones, con lo cual el mantenimiento y las interrupciones producidas en el funcionamiento de la fuente son mucho menores que en el caso de una fuente tipo Penning. Así, en una realización de la presente invención donde se emplea suministro de energía de radiofrecuencia mediante descarga capacitiva, trabajando a una frecuencia suficientemente alta (por ejemplo, 2.45 GHz) no se produce erosión en los materiales de la fuente. La descarga del plasma puede operar en dos modos distintos, el modo alfa, donde la descarga se mantiene gracias a los electrones secundarios emitidos por el cátodo (o la parte que en ese momento hizo de cátodo), y el modo gamma, donde el mecanismo de calentamiento del plasma por calentamiento sin colisiones (*collisionless heating*). El modo alfa se da en descargas DC y en RF a frecuencias bajas, y a partir de una cierta frecuencia que depende de las características del plasma se produce la transición al modo gamma.

25 La formación de un resonador o cámara resonante coaxial permite incrementar el campo eléctrico y facilitar la ignición, de manera que la fuente de iones de la presente invención consigue además un consumo energético mucho más reducido.

30 En la fuente de iones de la presente invención tampoco es necesario tener los cátodos calientes a temperaturas del orden de 2000 K, con lo que en lugar de emplear materiales conductores de elevada resistencia y alta emisión de electrones, como el tántalo, se pueden emplear otros menos costosos, como el cobre. Debido a la colisión de los iones con los cátodos su energía cinética se convierte en energía térmica que hace aumentar la temperatura de los cátodos, los cuales emiten electrones por efecto termiónico, que son necesarios para mantener la descarga DC en las fuentes Penning. Como en la presente invención las colisiones con los cátodos son mucho menos energéticas, el calentamiento de los cátodos es mucho menor y se pueden utilizar materiales conductores menos restrictivos térmicamente (es decir, con menor temperatura de fusión y mayor conductividad), como el cobre.

35 Además, en caso de producir H-, como la presente fuente de iones no genera electrones de alta energía en el plasma, se incrementa significativamente la corriente extraída. La sección transversal para producir H- es máxima a baja energía (1-10 eV); a mayores energías la sección transversal de producción disminuye mucho, mientras que la sección transversal de producción de destrucción de H- se incrementa notablemente, tal y como se explica en detalle en el documento H. Tawara, "Cross Sections and Related Data for Electron Collisions with Hydrogen Molecules and Molecular Ions".

Breve descripción de los dibujos

45 A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

50 La figura 1 muestra, de acuerdo con el estado del arte, una vista frontal de una sección transversal longitudinal de una fuente de iones tipo Penning de doble cavidad.

La figura 2 muestra, de acuerdo con el estado del arte, una vista en perspectiva de una sección transversal longitudinal de una fuente de iones tipo Penning de doble cavidad.

55 Las figuras 3, 4, 5 y 6 muestran diferentes vistas transversales de una fuente de iones según una posible realización de la presente invención.

60 Las figuras 7 y 8 muestran vistas transversales de una fuente de iones de doble cavidad según una posible realización de la presente invención.

La figura 9 representa otra posible realización de una fuente de iones, especialmente apropiada para ciclotrones de configuración axial.

65 Las figuras 10 y 11 muestra un ciclotrón con una configuración axial para la introducción de la fuente de iones.

Las figuras 12 y 13 muestran un ciclotrón con configuración radial para la introducción de la fuente de iones.

La figura 14 muestra una realización de la fuente de iones similar a la mostrada en la figura 6 pero sustituyendo el acoplo capacitivo por un acoplo inductivo.

5 Las figuras 15 y 16 muestran una realización de la fuente de iones con otro tipo distinto de acoplo (acoplo por guía de onda rectangular).

Las figuras 17, 18, 19 y 20 muestran diferentes vistas en sección parcial de una fuente de iones de acuerdo con otra posible realización.

10 La figura 21 ilustra, a modo de ejemplo, un sistema de radiofrecuencia completo en el que se puede utilizar la fuente de iones de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

15 La presente invención se refiere a una fuente de iones concebida principalmente para su uso como fuente interna en ciclotrones.

20 Actualmente se emplean fuentes de iones tipo Penning como fuente interna para ciclotrones, como por ejemplo la representada en la figura 1 (vista frontal de sección transversal longitudinal) y en la figura 2 (vista en perspectiva transversal longitudinal), que corresponde a una fuente de iones de doble cavidad.

25 La fuente de iones de tipo Penning de doble cavidad comprende dos cuerpos huecos, cada uno de ellos formado por dos piezas, una pieza conductora (1, 1') y una pieza aislante (2, 2'), que encajan entre sí de forma que sus paredes interiores delimitan una cavidad cilíndrica (3, 3'). Al menos una de las piezas conductoras 1 dispone de una entrada de suministro de gases 4 por la que se introduce en su respectiva cavidad 3 un gas para formación de plasma. En cada cavidad (3, 3') se dispone un conductor coaxial (5, 5') ubicado en la cavidad (3, 3') del cuerpo (1, 1'), dispuesto paralelo al eje longitudinal de la cavidad cilíndrica (3, 3').

30 Ambas cavidades (3, 3') están interconectadas mediante una cámara de expansión cilíndrica común (6) a través de respectivos orificios (7, 7') realizados en las paredes de las piezas conductoras (1, 1'). Una rendija de extracción de iones (8) ubicada en las paredes que delimitan la cámara de expansión (6), en su parte central, permite extraer iones del plasma generado a partir del gas introducido en las cavidades (3, 3').

35 Un elemento conductor (9, 9') está introducido en cada cavidad (3, 3'), penetrando a través de la pieza aislante (2, 2'), y en contacto eléctrico con el conductor coaxial (5, 5') de la cavidad. El elemento conductor (9, 9') se excita con tensiones DC de en torno a 3000 V. Para empezar la descarga es necesario abrir el flujo de gas y aplicar entre ánodo y cátodo (es decir, la pieza conductora 1/1' y el conductor coaxial 5/5') una diferencia de potencial de varios miles de voltios. Tras la ignición del plasma la fuente de alimentación lo estabiliza manteniendo una diferencia de potencial entre 500-1000V con una corriente de varios cientos de miliamperios. La descarga que se establece es de tipo DC, necesitando la emisión de electrones secundarios del material conductor (por lo que deben estar a alta temperatura y ser de un material con alta emisividad de electrones) y los iones que son expulsados del plasma se aceleran a alta energía, provocando la erosión de los cátodos.

45 La figura 3 representa un corte transversal vertical de una realización del dispositivo objeto de la presente invención, fuente de iones 10, según un plano de corte perpendicular al eje X, donde el campo magnético externo B (generado normalmente por un electroimán o un imán permanente cuando la fuente de iones está instalada y en funcionamiento) está alineado con el eje vertical Z del sistema de referencia.

50 El funcionamiento de la fuente de iones 10 se basa en una cavidad resonante coaxial. La figura 4 muestra un corte transversal de la fuente de iones 10 de acuerdo con el plano horizontal XY que pasa por el eje de la cavidad resonante. Las paredes interiores (11a, 11b, 11c) de un cuerpo 11 hueco son eléctricamente conductoras y definen una cavidad cilíndrica 13. En una realización todo el cuerpo 11 es conductor, preferentemente de cobre.

55 El cuerpo 11 dispone de tres paredes interiores: una primera pared interior 11a, de geometría circular, una segunda pared interior 11b, también circular y opuesta a la primera pared interior 11a, y una tercera pared interior 11c, de geometría cilíndrica, que conecta ambas paredes interiores circulares (11a, 11b).

60 Un conductor coaxial 15 está ubicado en la cavidad 13 del cuerpo 11, dispuesto paralelo al eje longitudinal de la cavidad 13 cilíndrica. Al menos uno de los extremos (15a, 15b) del conductor coaxial 15 está en contacto con una de las paredes interiores circulares (11a, 11b) del cuerpo 11, formando una cavidad resonante coaxial. De esta forma, el conductor coaxial 15 puede cortocircuitar ambas paredes interiores (11a, 11b) para obtener una cavidad resonante coaxial $\lambda/2$, obteniendo el campo eléctrico máximo en el centro, o cortocircuita una sola pared interior para obtener una cavidad resonante coaxial $\lambda/4$ (con el campo eléctrico máximo en el extremo opuesto del conductor). En el ejemplo de las figuras 3 y 4 solo uno de los extremos del conductor coaxial 15, en concreto el primer extremo 15a, cortocircuita una de las paredes interiores circulares del cuerpo 11 (en particular, la primera

pared interior 11a), formando de esta forma el cuerpo 11 y el conductor coaxial 15 una cavidad resonante coaxial $\lambda/4$, con el campo eléctrico máximo en el segundo extremo 15b del conductor coaxial 15.

5 El cuerpo 11 dispone de un puerto o una entrada de suministro de gases 14 (es decir, un orificio o abertura realizada en una de sus paredes) por la que se introduce en la cavidad 13 un gas para formación de plasma. En la figura 4 se muestra un tubo 20, herméticamente acoplado a la entrada de suministro de gases 14, a través del cual se introduce el gas en la cavidad 13. Este tipo de fuentes de iones funcionan generalmente con Hidrógeno, y en menor medida Deuterio y Helio, en función del ión que se desee extraer.

10 El cuerpo 11 también dispone de una entrada de suministro de potencia 21 a través de la cual se inyecta energía de radiofrecuencia en la cavidad 13.

15 Una cámara de expansión 16 está conectada a la cavidad 13 a través de un orificio de salida de plasma 17 realizado en una de las paredes del cuerpo 11. Una rendija de extracción de iones 18 está ubicada en una de las paredes de la cámara de expansión 16. La fuente de iones 10 se introduce a vacío en la cámara de un ciclotrón, y el gas que se inyecta se transforma parte en plasma y el resto se escapa por la rendija de extracción de iones 18.

20 El conductor coaxial 15 dispone de una protuberancia conductora 22 que se extiende en el interior de la cavidad 13 en dirección radial con respecto al eje de la cavidad cilíndrica (es decir, perpendicular a dicho eje), estando dicha protuberancia conductora 22 enfrentada al orificio de salida de plasma 17 del cuerpo 11 que conecta la cavidad 13 con la cámara de expansión 16 (es decir, la protuberancia conductora 22 está enfrentada a la cámara de expansión 16). La protuberancia conductora 22 no llega a contactar con la pared interior del cuerpo 11, aunque se queda muy próximo, normalmente a menos de 5 milímetros; esta distancia de separación dependerá en gran medida de las dimensiones de la cavidad resonante. El voltaje de ignición, potencia inyectada en el caso de RF, va a depender a su vez de esta distancia de separación y de la densidad del gas inyectado.

25 Dependiendo de dónde desee generarse el plasma, el cuerpo 11 está cortocircuitado por el conductor coaxial 15 interno en un extremo 15a o en ambos extremos (15a, 15b). El conductor coaxial 15 es un conductor interior que tiene una función de un electrodo opuesto al conductor exterior, las paredes interiores del cuerpo 11, de tal manera que al inyectar potencia la cavidad 13 entra en resonancia, y el campo eléctrico que se establece en el hueco entre los dos conductores (11, 15) va cambiando de signo.

30 En el ejemplo de las figuras 3 y 4 una parte del extremo libre del conductor coaxial 15, segundo extremo 15b, está modificada mediante un saliente o protuberancia conductora 22 dirigida hacia la cámara de expansión 16, con objeto de producir una concentración y un aumento del campo eléctrico en la zona donde se desea producir el plasma (zona de producción de plasma). A través del orificio de salida de plasma 17 el plasma producido escapa de la cavidad 13 hacia la cámara de expansión 16, formando una columna de plasma 23 alineada con el campo magnético B, de la cual se extraen los iones utilizando la rendija de extracción de iones 18. La cámara de expansión 16 es una cavidad, de geometría preferentemente también cilíndrica, que realiza la función de cámara de expansión para la columna de plasma 23. En las fuentes de iones aplicadas a los ciclotrones, la cámara de expansión 16 es una cavidad cilíndrica de radio pequeño para que tras extraer las partículas por la rendija de extracción de iones 18 y ser aceleradas en el primer giro no colisionen con la fuente y se pierdan. La cámara de expansión 16 también actúa como soporte mecánico, manteniendo separadas las dos partes simétricas de la fuente de iones, cuando se tratan de fuente de iones de doble cavidad (como la representada en las figuras 1 y 2).

35 Como se muestra en la realización de la figura 4, a través del acceso, puerto o entrada de suministro de potencia 21, se acopla una guía de onda coaxial 24 que transporta la energía de radiofrecuencia/microondas, pudiendo ser el acoplo de tipo eléctrico (capacitivo) o magnético (inductivo). En la figura 4 se presenta un acoplo capacitivo típico, donde el dieléctrico 25 que envuelve al conductor interior 26 de la guía de onda coaxial 24 permite el cierre hermético de la entrada de suministro de potencia 21 (para que no escape parte del gas inyectado por dicha entrada), y donde el conductor interior 26 de la guía de onda coaxial 24 sobresale del dieléctrico 25, entrando parcialmente en el interior de la cavidad 13. A diferencia de este acoplo capacitivo, un acoplo inductivo típico emplea una espira que cortocircuita el interior de la guía de onda coaxial con la cavidad resonante.

40 La frecuencia de la cavidad resonante puede ajustarse mediante un inserto o pieza móvil 27 que se introduce parcialmente en la cavidad 13. La pieza móvil 27 se puede desplazar, en el momento de la configuración inicial de la fuente de iones 10, en dirección radial (es decir, perpendicular al eje de la cavidad 13 cilíndrica), permitiendo de esta forma realizar un ajuste fino de la frecuencia de resonancia en función del volumen de la pieza móvil 27 que se introduzca en el interior de la cavidad 13. La pieza móvil 27 es un elemento opcional, no estrictamente necesario para el funcionamiento de la fuente de iones, si bien mejora el funcionamiento al facilitar el ajuste de la frecuencia de resonancia. La pieza móvil 27 puede estar fabricada de material conductor (preferentemente cobre), o de material dieléctrico (como alúmina), dependiendo del comportamiento y la variación en frecuencia que desee conseguirse.

45 Las figuras 5 y 6 muestran dos vistas adicionales de la fuente de iones 10, de acuerdo con una posible realización. La figura 5 ilustra una vista frontal de la fuente de iones 10, donde la parte por encima del eje de la cavidad 13 se

muestra en sección media. La figura 6 representa una vista tridimensional de una fuente de iones 10. La entrada de suministro de gases 14 no llega a apreciarse en la figura 6 al estar ubicada en esta vista en la parte trasera del cuerpo 11. El resalte 70 mostrado en la figura 6 es un elemento con la misma función que la pieza móvil 27 de la figura 4, un elemento mediante el cual se realiza el ajuste fino de la frecuencia de la cavidad resonante. En este caso el resalte 70 está integrado en el cuerpo de la fuente de iones, pero podría diseñarse como un cuerpo separado.

Las figuras 7 y 8 muestran, respectivamente y de acuerdo con otra realización, una sección frontal y una sección en perspectiva de una fuente de iones 30 de doble cavidad, con un plano de simetría 31 en la parte central de la rendija de extracción de iones 18, estando ambas cavidades (13, 13') conectadas por una cámara de expansión 16 común, la cual permite la expansión de la columna del plasma 23 producida en cada cavidad (13, 13'). Los elementos de la fuente de iones 30 para cada una de las dos cavidades (13, 13') son los mismos que los mostrados en las figuras 3 a 6 para la fuente de iones 10 de una única cavidad (primer cuerpo 11 y segundo cuerpo 11', primer conductor coaxial 15 y segundo conductor coaxial 15', primera protuberancia conductora 22 y segunda protuberancia conductora 22', primer orificio de salida de plasma 17 y segundo orificio de salida de plasma 17', etc.), con la particularidad en este caso de que ambas cavidades (13, 13') están enfrentadas entre sí y comparten la cámara de expansión 16. Las fuentes de iones de doble cavidad 30 se emplean para obtener plasma más fácilmente y aumentar la producción de partículas, de tal manera que en ambos extremos se producen dos chorros de plasma que convergen a la altura del plano de simetría 31, formando una única columna de plasma 23 en la parte central, donde está situada la rendija de extracción de iones 18 para sacar las partículas deseadas, ya sean iones positivos o negativos.

La longitud de la cavidad resonante (a lo largo del eje Y), es del orden o menor de $\lambda/4$ (siendo λ la longitud de onda asociada al campo electromagnético oscilante mediante la relación $A=f/c$, donde f es la frecuencia de oscilación y c la velocidad de la luz) en caso de las cavidades resonantes cortocircuitadas por un extremo (cavidades de cuarto de onda). En el caso de las cavidades resonantes de media onda, cortocircuitadas por ambos extremos y con formación de plasma en la parte central del conductor interior, la longitud de la cavidad resonante será del orden o menor que $\lambda/2$. Las dimensiones transversales, así como las de la protuberancia conductora 22 para concentrar el campo eléctrico, están determinadas por los parámetros concretos de la cavidad resonante que se quieran obtener, principalmente el factor de calidad Q y la impedancia característica R/Q, y también influirán en la frecuencia resonante de la cavidad.

Las paredes interiores del cuerpo 11 están hechas de un material conductor de baja resistividad eléctrica y alta conductividad térmica, generalmente cobre o cobre depositado sobre otro metal, ya que se desea que el factor Q sea elevado y la potencia depositada en las paredes sea rápidamente disipada.

Para operar la fuente de iones (10; 30) se parte del estado inicial, donde no hay energía en la cavidad 13 o cavidades (13, 13'). La energía de radiofrecuencia que se introduce en la cavidad es producida en un generador, que puede ser de estado sólido, tubo de electrones (magnetron, TWT, girotron, klystron, etc.) o un circuito resonante de bobina y condensador, dependiendo de la frecuencia, potencia y modo de trabajo requerido. Dicha potencia viaja por una guía de onda, generalmente coaxial o hueca (por ejemplo, rectangular) hasta la cavidad, donde mediante un acoplo (eléctrico, inductivo o por agujero) se transfiere la potencia a la cavidad resonante, minimizando reflexiones y pérdidas de potencia. A medida que se introduce en la cavidad energía electromagnética (de frecuencia igual a la resonante de la cavidad) va aumentando en magnitud el valor del campo eléctrico, de tal manera que llega un punto en el que se produce la ignición del plasma (curva de Paschen para campos electromagnéticos oscilantes). Una vez se forma el plasma, que se expande a través del orificio de salida de plasma 17 difundiéndose a lo largo de las líneas de campo magnético generadas por un electroimán o un imán permanente, la frecuencia resonante de la cavidad se desplaza, de manera que si la frecuencia del campo electromagnético que se suministra a la cavidad sigue constante, empieza a reflejarse potencia debido a la diferencia de impedancias, llegando a un punto en el que se reflejará toda la potencia excepto la necesaria para mantener la descarga y compensar pérdidas en las paredes de la cavidad, estabilizándose el sistema en el estado estacionario.

De acuerdo con una posible realización, un diseño concreto de la presente invención utiliza una cavidad resonante coaxial $\lambda/4$, con aproximadamente 3 cm de longitud para una frecuencia de 2.45 GHz, con un extremo cortocircuitado y otro abierto, fabricada en cobre. En la parte del extremo abierto del conductor coaxial 15 interior hay una protuberancia conductora 22 saliente en la misma dirección del campo magnético (en la dirección vertical Z) que se enfrenta al orificio de salida del plasma 17 y que permite aumentar el campo eléctrico en esa zona para conseguir la formación del plasma con menos potencia. El plasma sale por el orificio de salida del plasma 17 y entra en la cámara de expansión 16, donde se difunde mayoritariamente en la dirección de las líneas de campo magnético (paralelas al eje Z) formando una columna de plasma 23, y pasa cerca de la rendija de extracción de iones 18, donde mediante un campo eléctrico se extraen los iones.

En la realización mostrada en las figuras, la entrada de suministro de gases 14 se implementa mediante un simple agujero conectado a un tubo 20, mientras que el acoplo del sistema de radiofrecuencia se realiza con acoplo eléctrico mediante un cilindro protuberante (dieléctrico 25) conectado al conductor interior 26 de una guía de onda coaxial 24. Otras alternativas para la introducción de potencia son un acoplo magnético mediante una espira o un

orificio hecho a una guía de onda. La frecuencia resonante de la cavidad se ajusta mediante la pieza móvil 27.

La figura 9 ilustra una fuente de iones 40 según otra posible realización, donde cambia la ubicación del orificio de salida de plasma 17 (en este caso se sitúa en la segunda pared interior 11b circular) y la orientación de la cámara de expansión 16 con respecto a la cavidad 13. Además, la protuberancia conductora 22 de la fuente de iones 40 para esta realización es preferentemente de sección circular, para mantener de esta forma la simetría interna en la cavidad 13 (la protuberancia conductora 22 de la figura 9 sobresale a cada lado -superior e inferior- del conductor coaxial 15). Sin embargo, la protuberancia conductora 22 de la figura 3 puede tener diferentes tipos de secciones, en función de la geometría y dimensiones de la cavidad, el conductor coaxial y el orificio de salida de plasma (la sección transversal se puede optimizar mediante simulación para obtener una mayor concentración del campo eléctrico frente al orificio de salida de plasma 17 que favorezca la formación y estabilidad del plasma), de forma que la protuberancia conductora 22 solo sobresale en un lado, superiormente. El círculo superior ilustrado en la figura 9 representa el resonador 12 (es decir, la cavidad resonante coaxial) que se forma cuando la fuente de iones 40 está en funcionamiento.

Mientras que en la fuente de iones 10 de las figuras 3 a 6 el eje principal de la cámara de expansión 16 se dispone perpendicular al eje de la cavidad 13 cilíndrica, en la fuente de iones 40 de la figura 9 ambos ejes son paralelos (en el ejemplo de la figura 9 son coincidentes), lo cual permite acoplar las fuentes de iones en ciclotrones de manera axial.

Las fuentes de iones internas para ciclotrones pueden introducirse en el ciclotrón de manera radial o axial. Las figuras 10 y 11 muestran respectivamente una vista frontal y en perspectiva (parcialmente seccionada) de un ciclotrón 41 (en la figura del ciclotrón se han omitido componentes como las bobinas del imán, el sistema de radiofrecuencia – aceleración–, el sistema de extracción y el sistema de vacío y apertura del hierro) con configuración axial para la introducción de una fuente de iones. En el ciclotrón 41 de las figuras 10 y 11 se introduce la fuente de iones con la configuración axial de la figura 9, donde el diseño electromagnético y mecánico de las fuentes de iones es más sencillo. En las figuras 12 y 13 se muestra un ciclotrón 46 con configuración radial para la introducción de la fuente de iones, donde el diseño de las fuentes de iones es más complicado (corresponde a las fuentes de iones representadas en las figuras 3 a 6). En las figuras 10, 11, 12 y 13 se emplean las siguientes referencias:

41 y 46 – Ciclotrón.

42 y 47 – Brida de la fuente de iones. Tiene los pasamuros del gas, la guía de onda y la refrigeración líquida (en caso de ser necesaria). También hace el cierre a vacío.

43 – Tubo del gas, guía de onda y refrigeración. Hacen de soporte mecánico a la fuente de iones y pueden ir integrados o por separado. Podría incluir un soporte dedicado si fuera necesario. En el caso de inserción radial suelen ir blindados para aguantar el impacto de las partículas que se pierden.

44 – Hierro del imán. Guía el campo magnético y sirve para atenuar la radiación.

45 – Polo del imán (la parte circular puede estar mecanizada para modificar el campo magnético).

48 – Fuente de iones.

Como se indicó anteriormente en la descripción de la figura 4, a través de la entrada de suministro de potencia 21 se acopla una guía de onda coaxial 24 que transporta la energía de radiofrecuencia/microondas. El acoplo puede ser eléctrico/capacitivo o magnético/inductivo. La figura 14 muestra una realización como la mostrada en la figura 6 pero sustituyendo el acoplo capacitivo por un acoplo magnético, donde una espira 49 cortocircuita el conductor interior 26 de la guía de onda coaxial 24 con la pared interior del cuerpo 11. En las figuras 15 y 16 se muestran en dos vistas diferentes (vista superior y vista en perspectiva, con sección parcial) otro tipo de acoplo, acoplo por guía de onda rectangular 71. En este caso el acoplo se realiza mediante un orificio 72 que une la cavidad 13 con el vacío de la guía de onda rectangular 71. Actuaría como un dipolo eléctrico y uno magnético que radian en ambos lados, de manera que si en un lado hay mayor densidad de energía, se transfiere energía al otro lado hasta que alcanzan un equilibrio. En esta realización, la fuente de iones 10 tiene unas mayores dimensiones debido a la guía de onda rectangular 71, la cual además debe ir en vacío.

Las figuras 17, 18, 19 y 20 muestran diferentes vistas en sección parcial (en particular, una vista frontal, una vista superior, una vista frontal en perspectiva y una vista trasera en perspectiva, respectivamente) de una realización de la fuente de iones 10 donde los dos extremos (15a, 15b) del conductor coaxial 15 están respectivamente en contacto con las dos paredes interiores circulares (11a, 11b) del cuerpo 11, obteniendo de esta forma una cámara resonante coaxial $\lambda/2$.

La figura 21 muestra, a modo de ejemplo, un sistema de radiofrecuencia 50 completo en el que se puede utilizar la fuente de iones (10; 30; 40) de la presente invención. El sistema de radiofrecuencia comprende un generador 51 de potencia suficiente y parámetros ajustables para conseguir la ignición del plasma, un circulador 52 con una carga 53 para absorber la potencia reflejada y un acoplador direccional 54 con un medidor de potencia 55 para monitorizar la potencia incidente y reflejada.

La fuente de iones (10; 30; 40) se coloca inmersa en un campo magnético generado por un electroimán o por un imán permanente 56, donde el sentido de las líneas de campo no es importante, tan solo su dirección. La fuente

ES 3 014 992 T3

de iones (10; 30; 40) está unida, a través de la entrada de suministro de gases 14, a un sistema de inyección de gases 57, que comprende un reservorio o depósito de gas 58 y se dosifica mediante un sistema de regulación 59. La fuente de iones (10; 30; 40) está ubicada en una cámara 60 con un vacío suficiente para que los iones no se vean neutralizados por el gas residual y puedan ser acelerados para su posterior uso.

5

La potencia de radiofrecuencia necesaria la provee el generador 51, y la potencia transmitida se mide con el medidor de potencia 55 conectado al acoplador direccional 54. El generador 51 está protegido con el circulador 52 que desvía la potencia reflejada por la fuente de iones (10; 30; 40) a la carga 53.

REIVINDICACIONES

1. Una fuente de iones interna para ciclotrones de baja erosión, que comprende:
 - un cuerpo (11) hueco cuyas paredes interiores (11a, 11b, 11c) definen una cavidad cilíndrica (13), donde el cuerpo (11) dispone de una entrada de suministro de gases (14) por la que se introduce en la cavidad (13) un gas para formación de plasma;
 - un conductor coaxial (15) ubicado en la cavidad (13) del cuerpo (11) y dispuesto paralelo al eje longitudinal de la cavidad (13);
 - una cámara de expansión (16) conectada a la cavidad (13) a través de un orificio de salida de plasma (17) realizado en el cuerpo (11);
 - una rendija de extracción de iones (18) en contacto con la cámara de expansión (16);
donde:
 - el cuerpo (11) dispone de una entrada de suministro de potencia (21) a través de la cual se inyecta energía de radiofrecuencia en la cavidad (13);
 - las paredes interiores del cuerpo (11) son conductoras;
 - al menos uno de los extremos (15a; 15b) del conductor coaxial (15) está en contacto con al menos una pared interior circular (11a, 11b) del cuerpo (11), formando una cavidad resonante coaxial; caracterizada porque:
 - el conductor coaxial (15) dispone de una protuberancia conductora (22) que se extiende en el interior de la cavidad (13) en dirección radial, estando dicha protuberancia conductora (22) enfrentada al orificio de salida de plasma (17).
2. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizada porque comprende además una pieza móvil (27) introducida parcialmente en la cavidad (13) en dirección radial a través de una abertura realizada en el cuerpo (11) para realizar un ajuste fino de la frecuencia de la cavidad resonante.
3. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizada porque la pieza móvil (27) es de material conductor.
4. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizada porque la pieza móvil (27) es de material dieléctrico.
5. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada porque el suministro de energía de radiofrecuencia se realiza a través de un acoplo capacitivo mediante una guía de onda coaxial (24) cuyo conductor interior (26) está introducido parcialmente en la cavidad (13) a través de la entrada de suministro de potencia (21).
6. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada porque el suministro de energía de radiofrecuencia se realiza a través de un acoplo inductivo mediante una espira (49) que cortocircuita una pared interior del cuerpo (11) con un conductor interior (26) de una guía de onda coaxial (24) introducida a través de la entrada de suministro de potencia (21).
7. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque un primer extremo (15a) del conductor coaxial (15) está en contacto con una pared interior circular (11a) del cuerpo (11), estando el segundo extremo (15b) del conductor coaxial libre, y donde la protuberancia conductora (22) está ubicada en el segundo extremo (15b) del conductor coaxial (15).
8. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 7, caracterizada porque la cámara de expansión (16) es cilíndrica y el eje longitudinal de la cavidad (13) está dispuesto perpendicular al eje longitudinal de la cámara de expansión (16).
9. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 7, caracterizada porque la cámara de expansión (16) es cilíndrica y el eje longitudinal de la cavidad (13) está dispuesto paralelo al eje longitudinal de la cámara de expansión (16).
10. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada porque los dos extremos (15a, 15b) del conductor coaxial (15) están respectivamente en contacto con las dos paredes interiores circulares (11a, 11b) del cuerpo (11).
11. La fuente de iones de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizada porque la protuberancia conductora (22) está ubicada en la parte central del conductor coaxial (15).
12. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque todo el cuerpo (1) es conductor.
13. La fuente de iones de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque

comprende además un segundo cuerpo (11') y un segundo conductor (15') que forman una segunda cavidad resonante coaxial; estando las cavidades (13, 13') de ambos cuerpos (11, 11') conectadas entre sí a través de una cámara de expansión común (16).

DIBUJOS

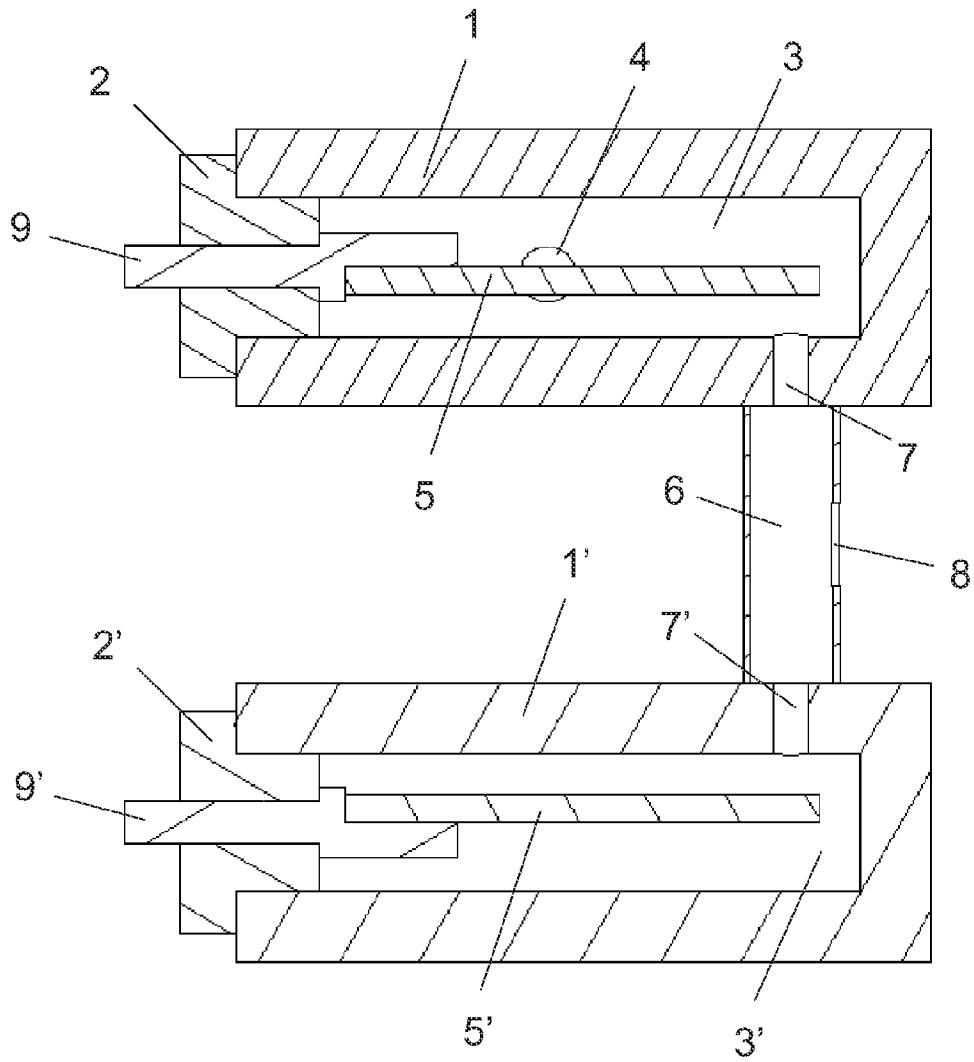


Fig. 1

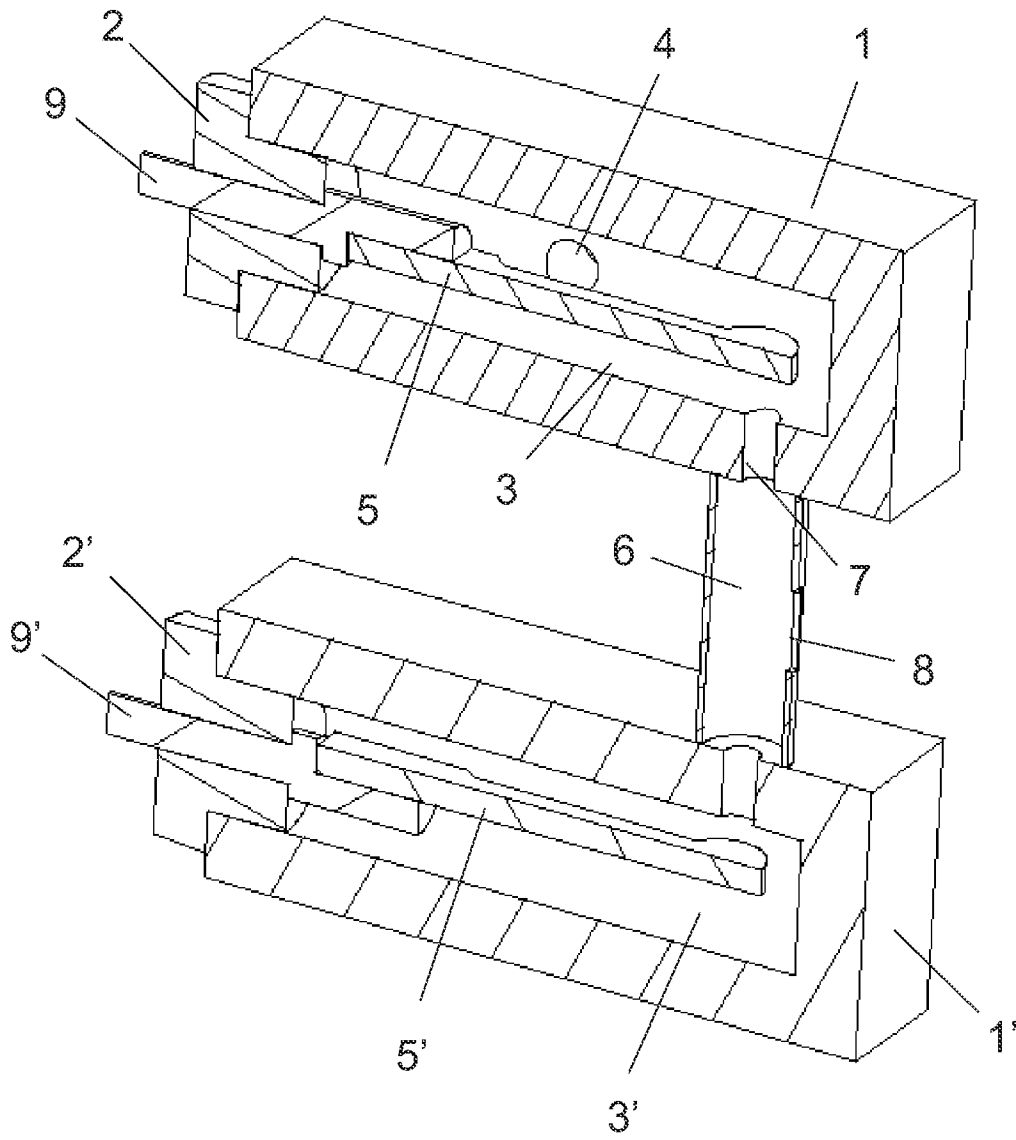


Fig. 2

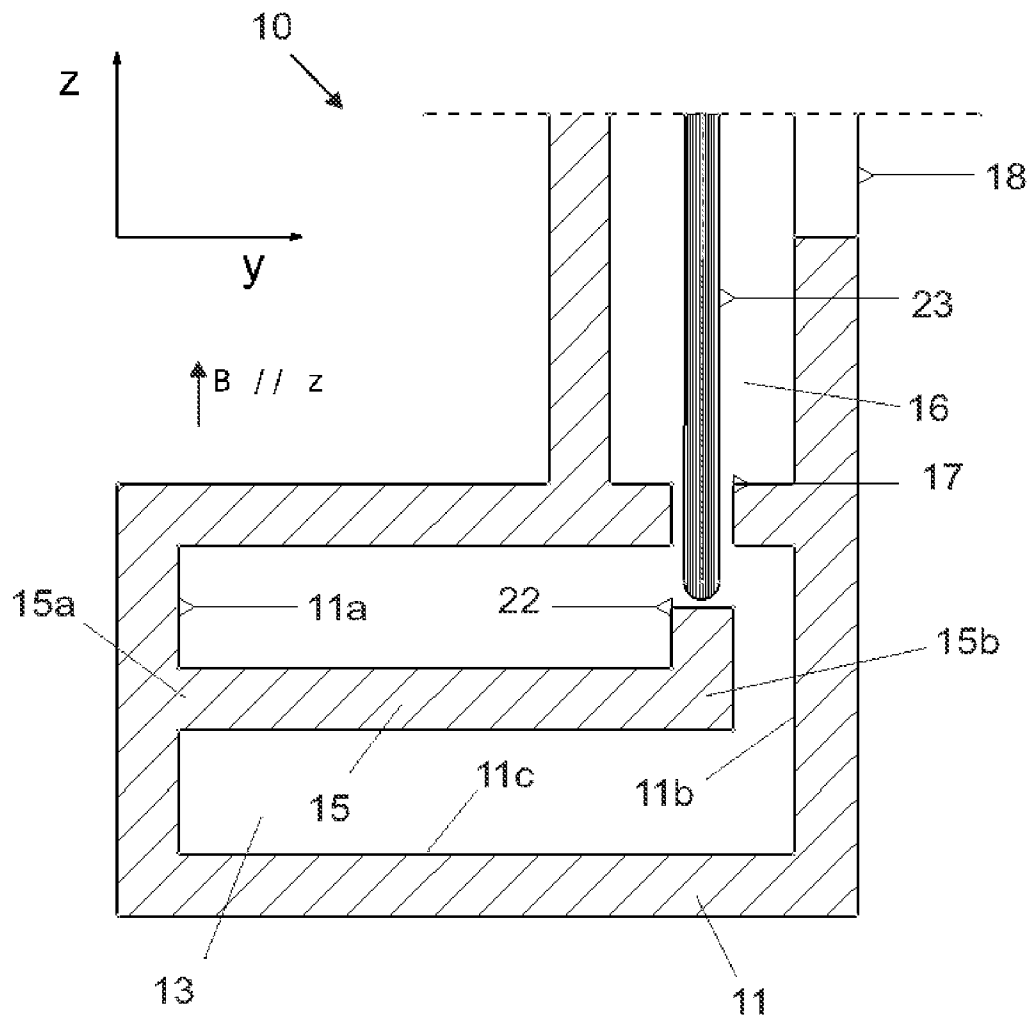


Fig. 3

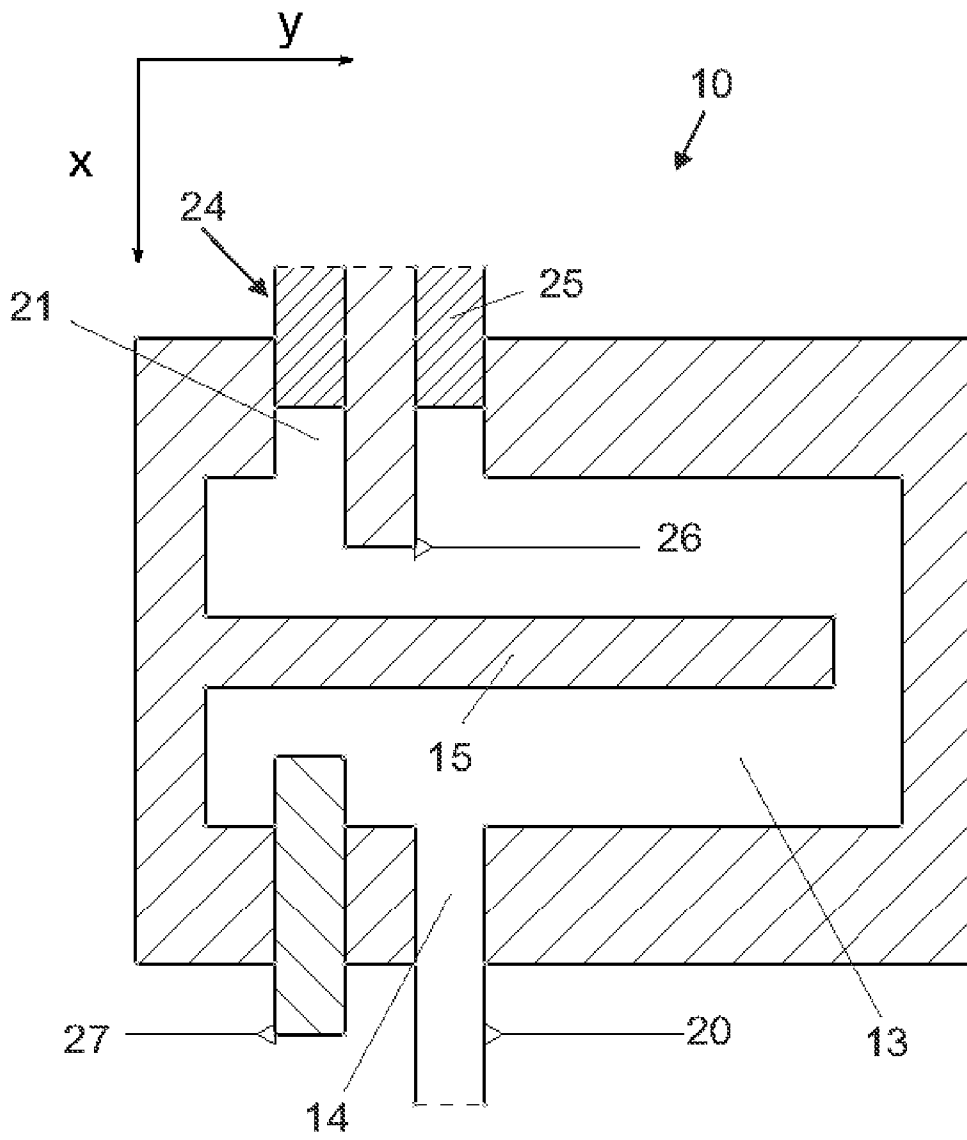


Fig. 4

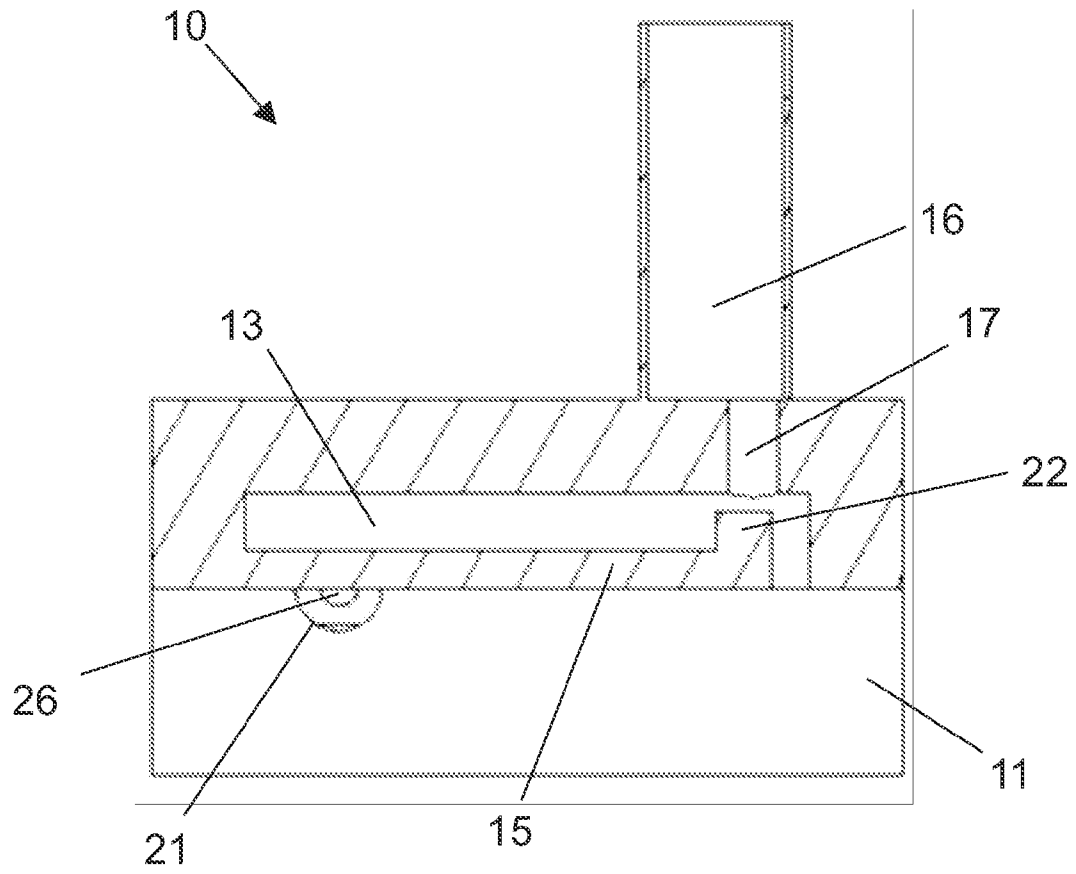


Fig. 5

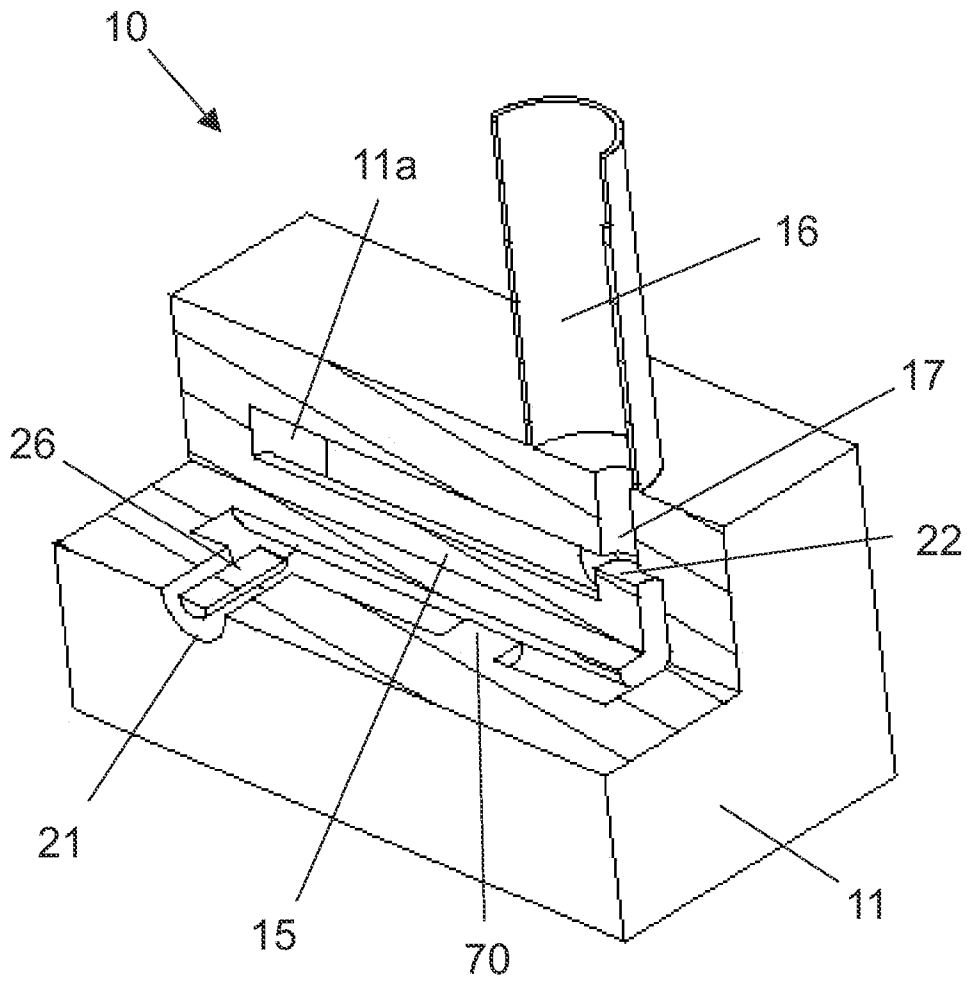


Fig. 6

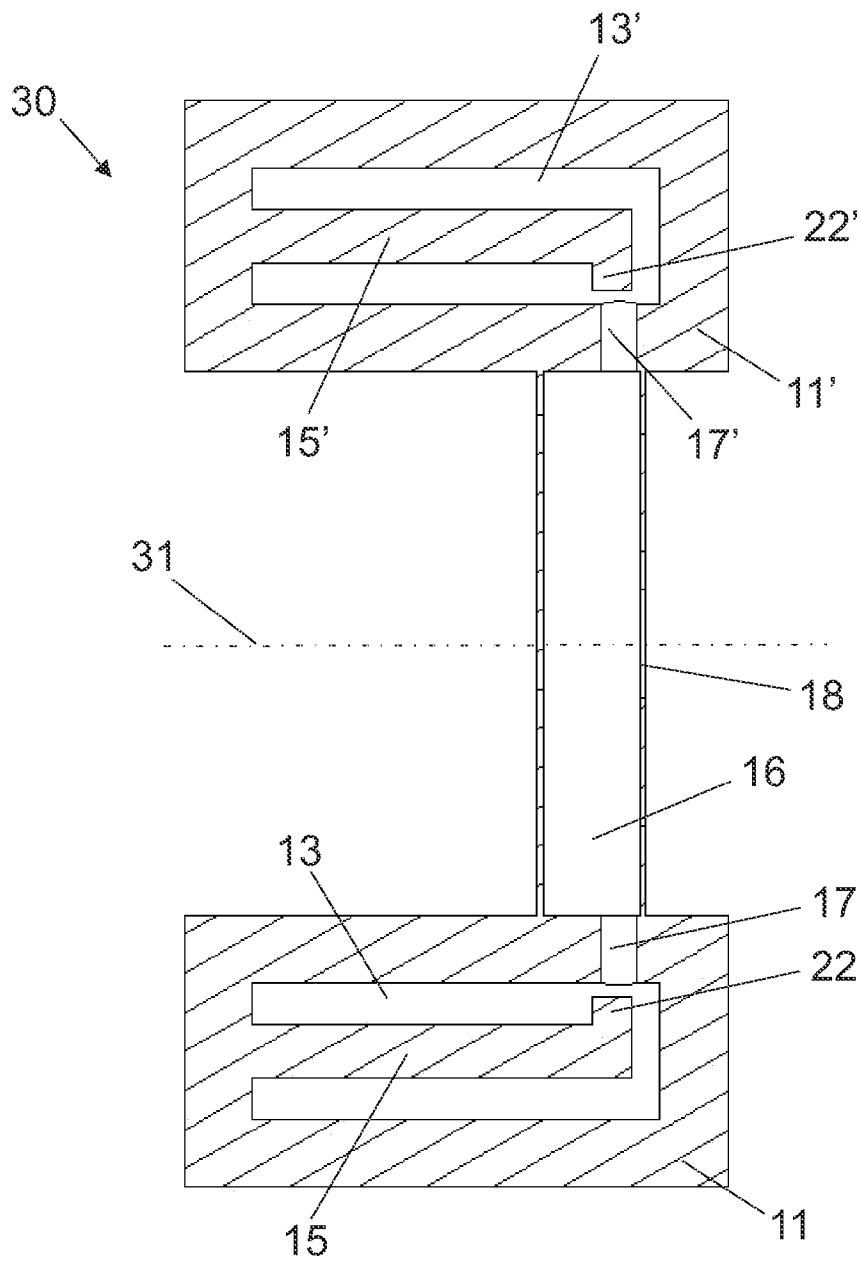


Fig. 7

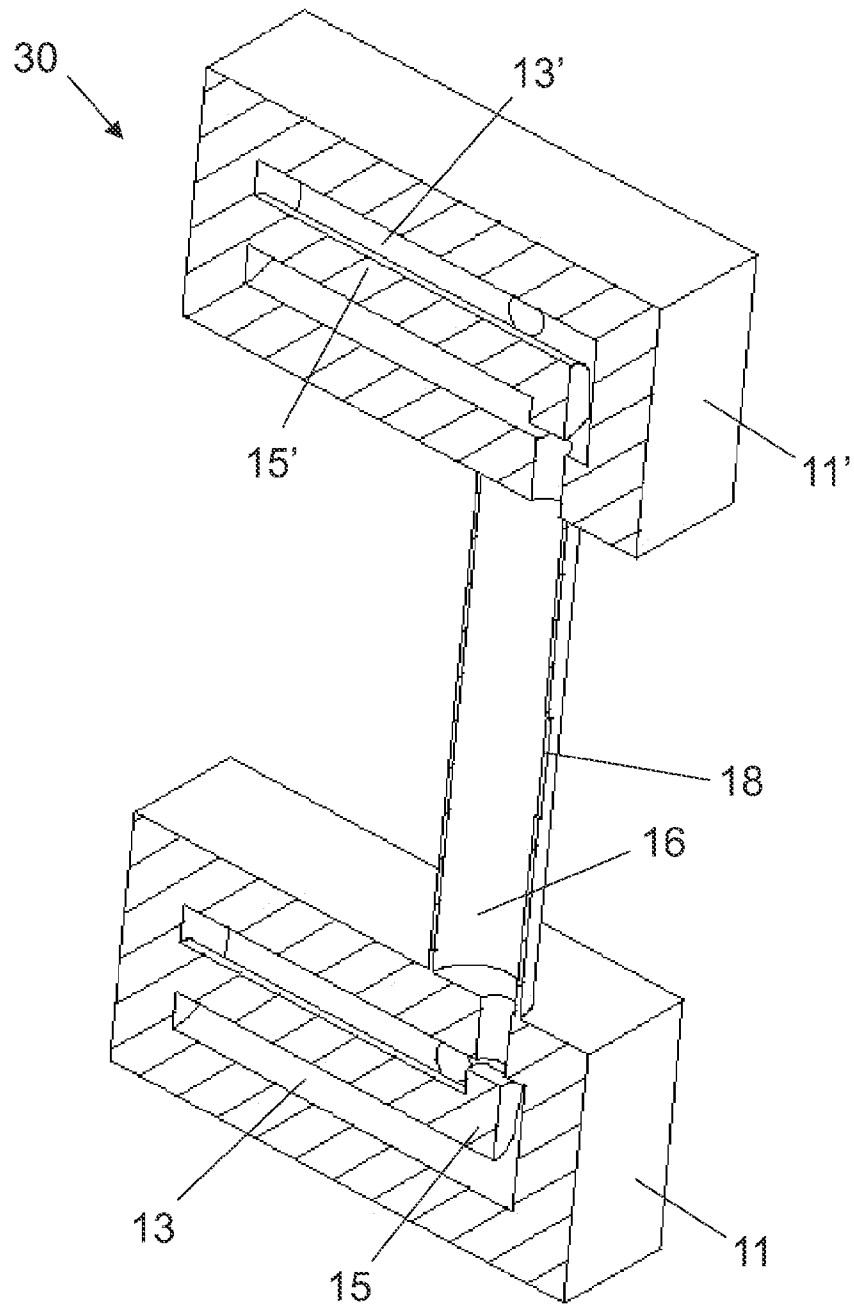


Fig. 8

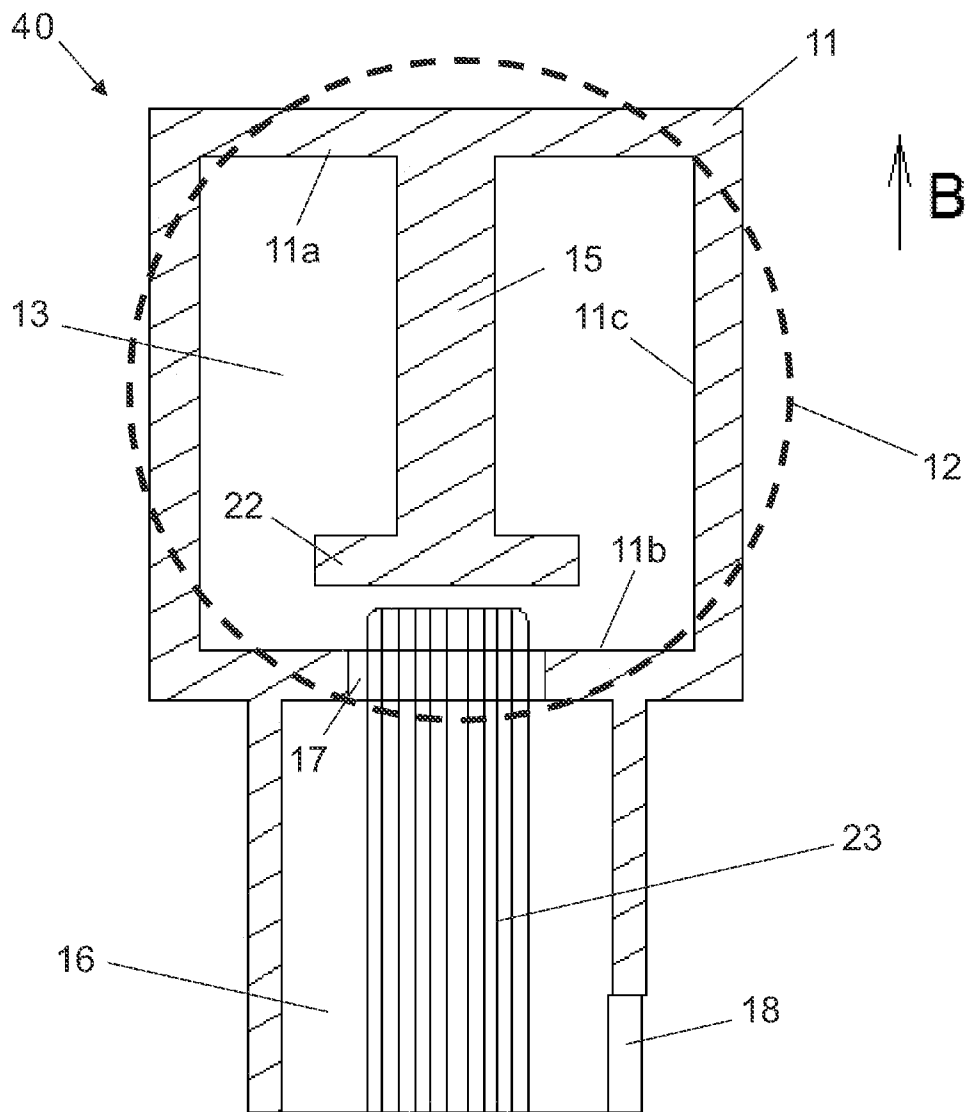


Fig. 9

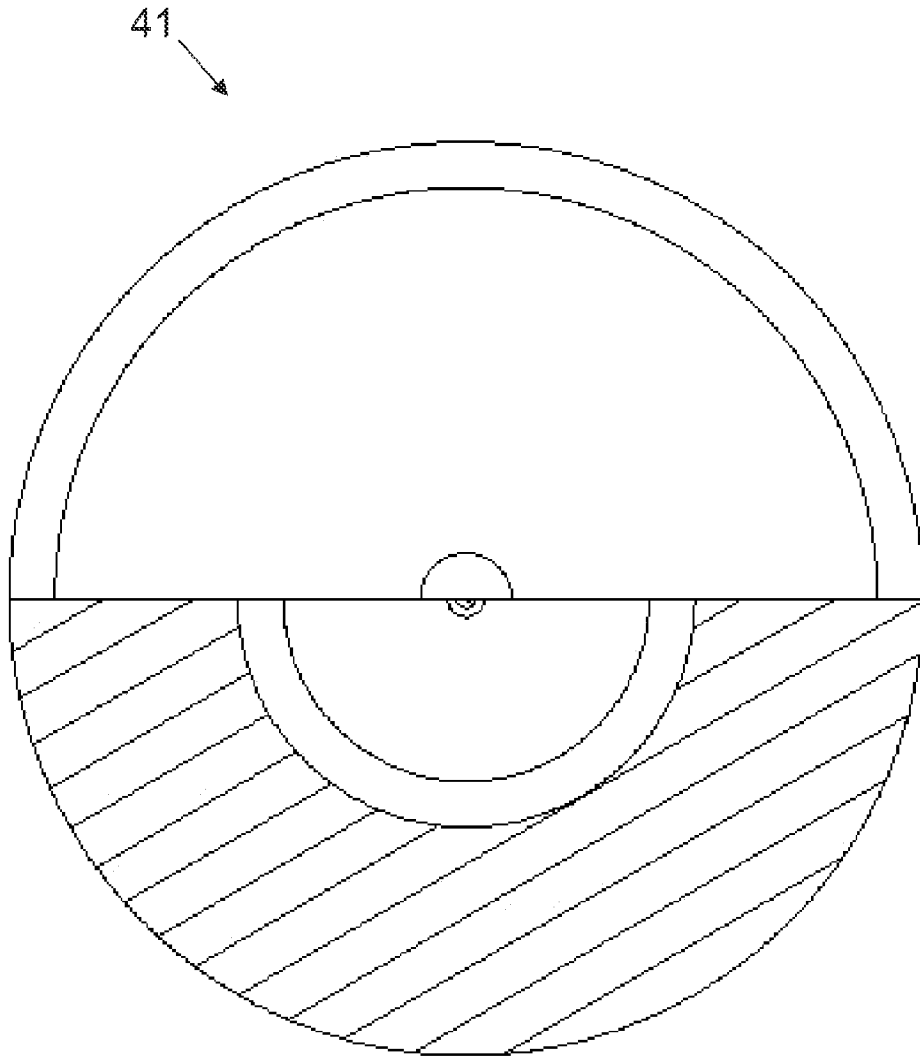


Fig. 10

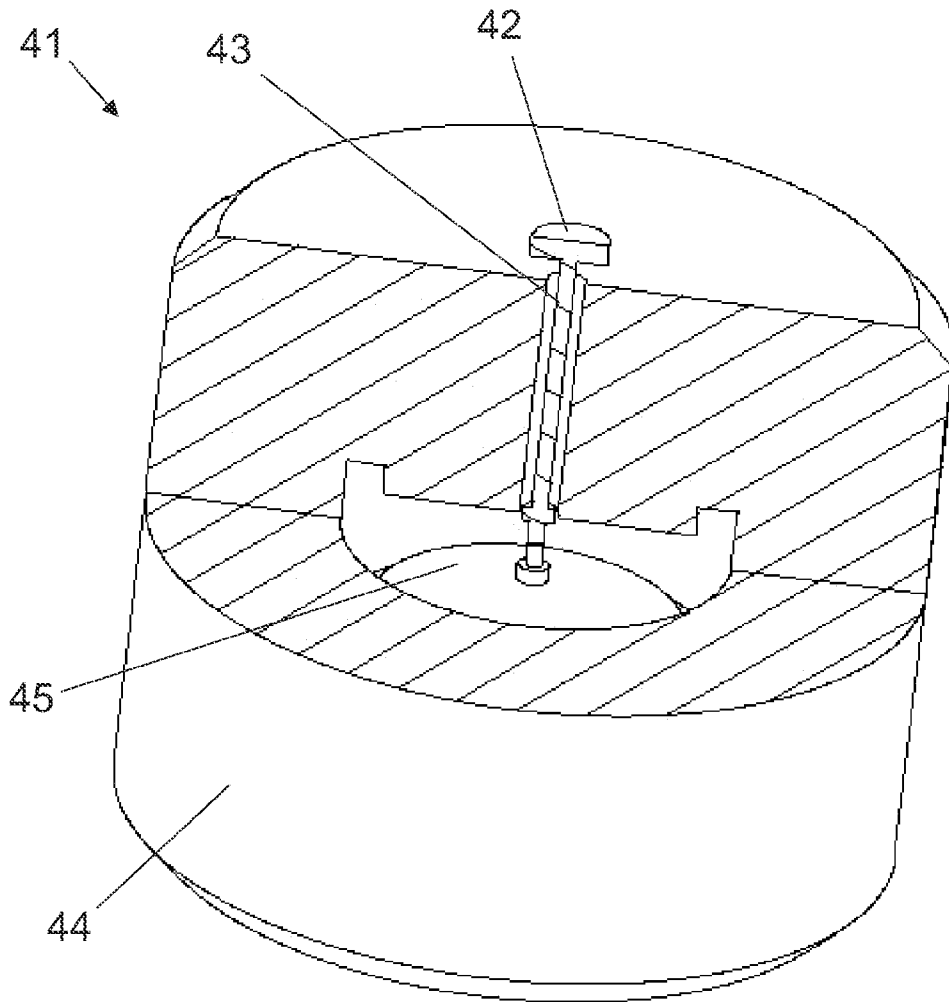


Fig. 11

46

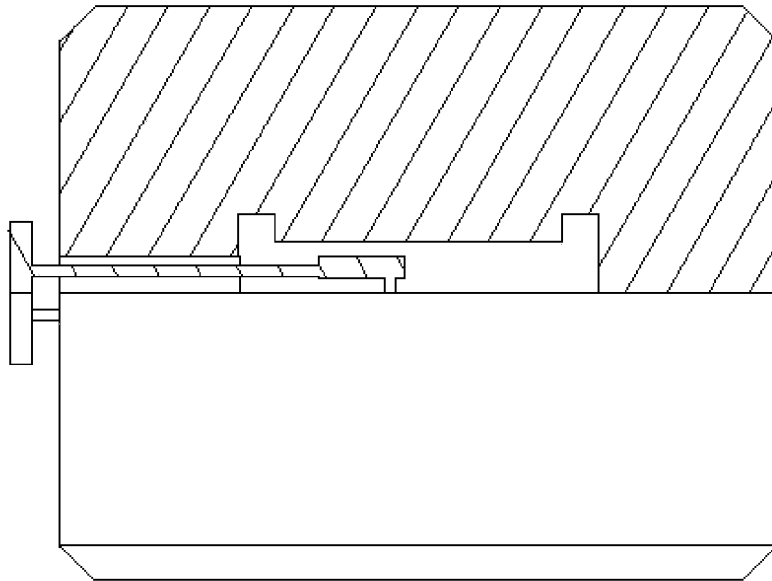


Fig. 12

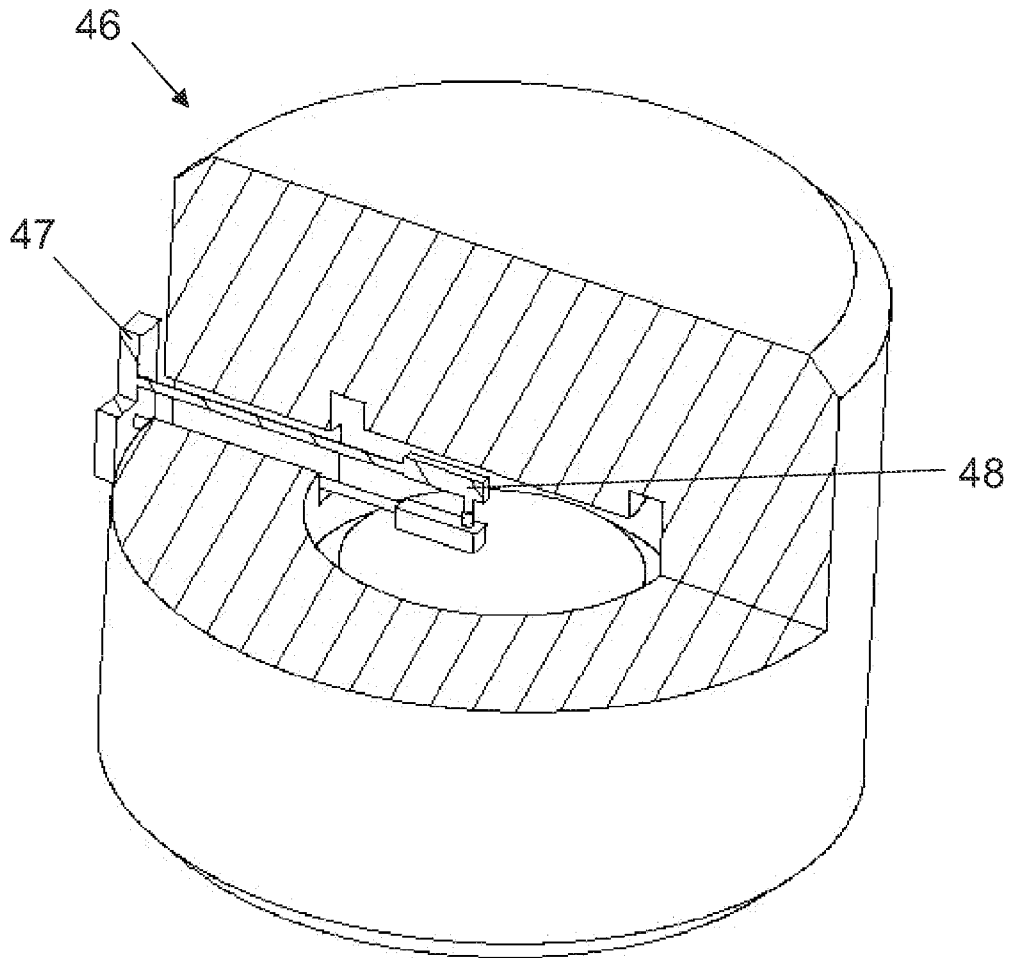


Fig. 13

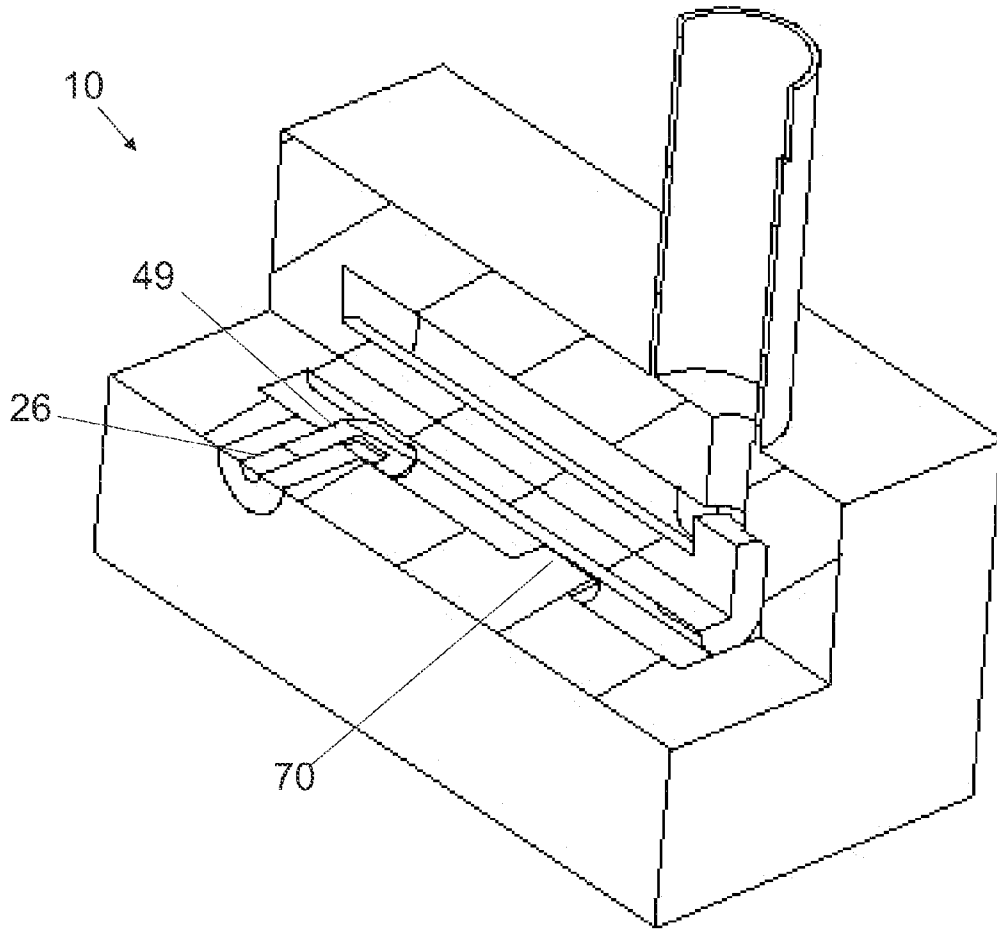


Fig. 14

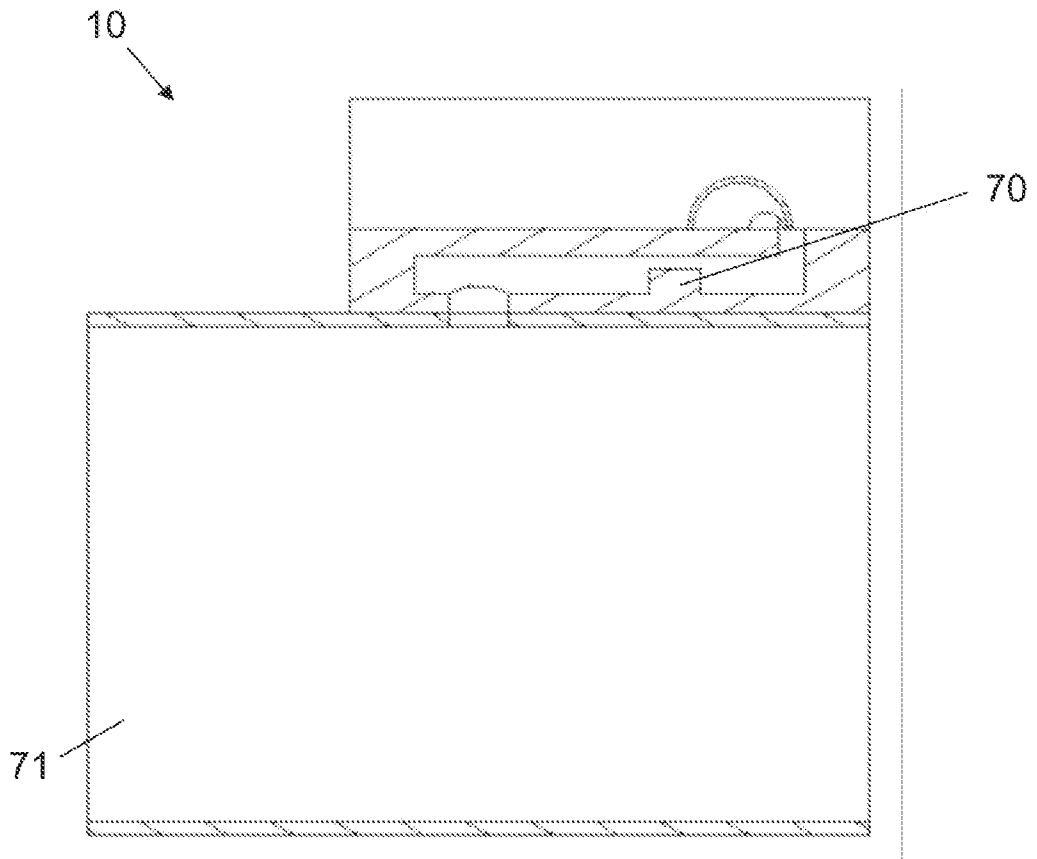


Fig. 15

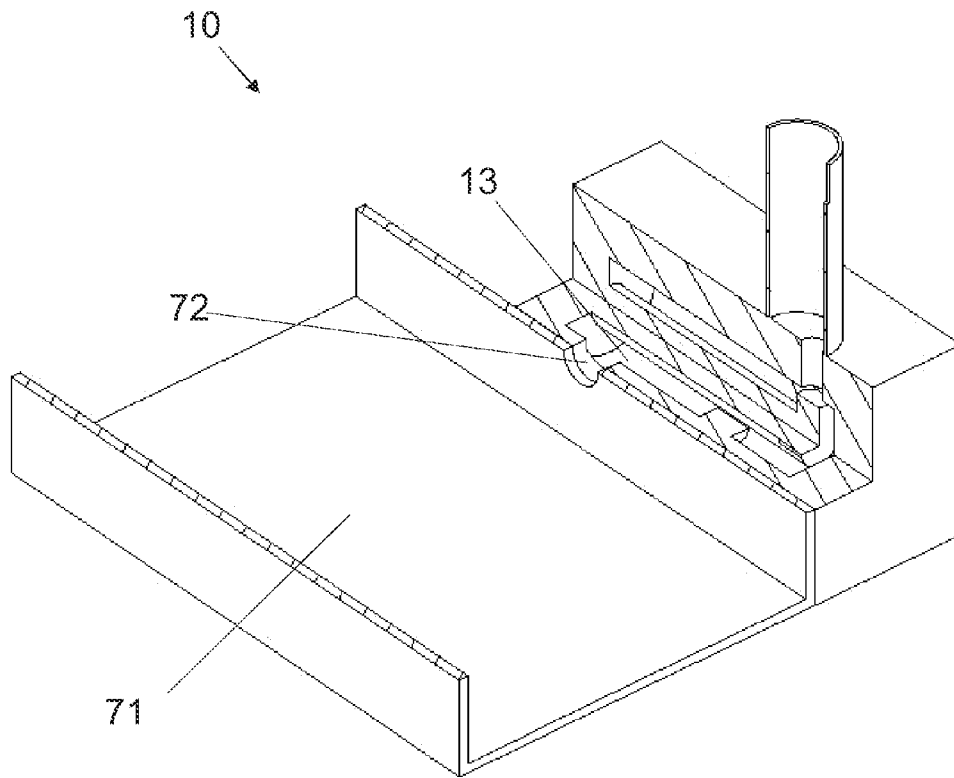


Fig. 16

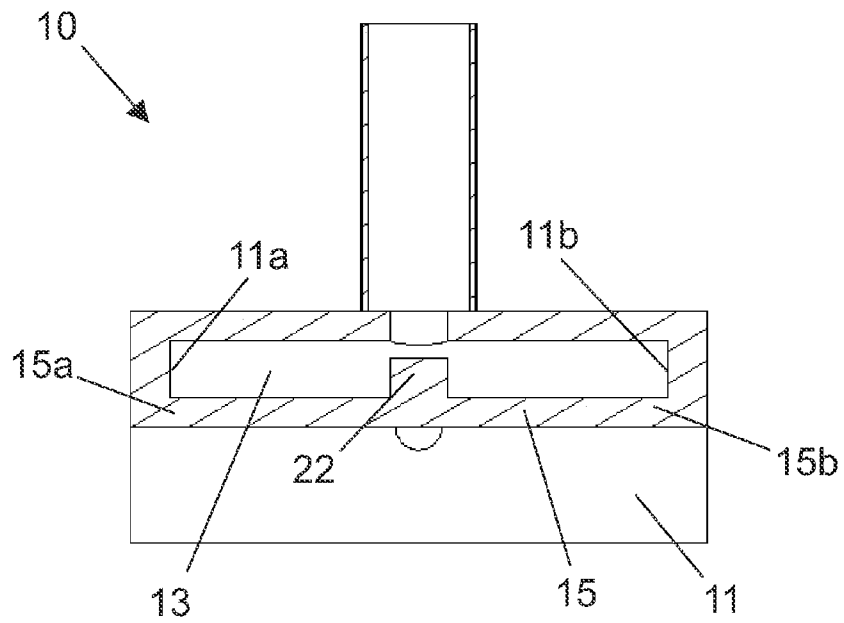


Fig. 17

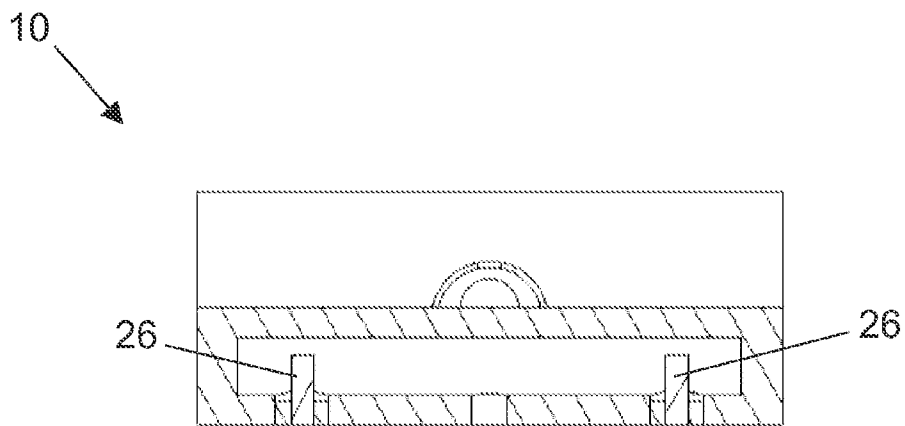


Fig. 18

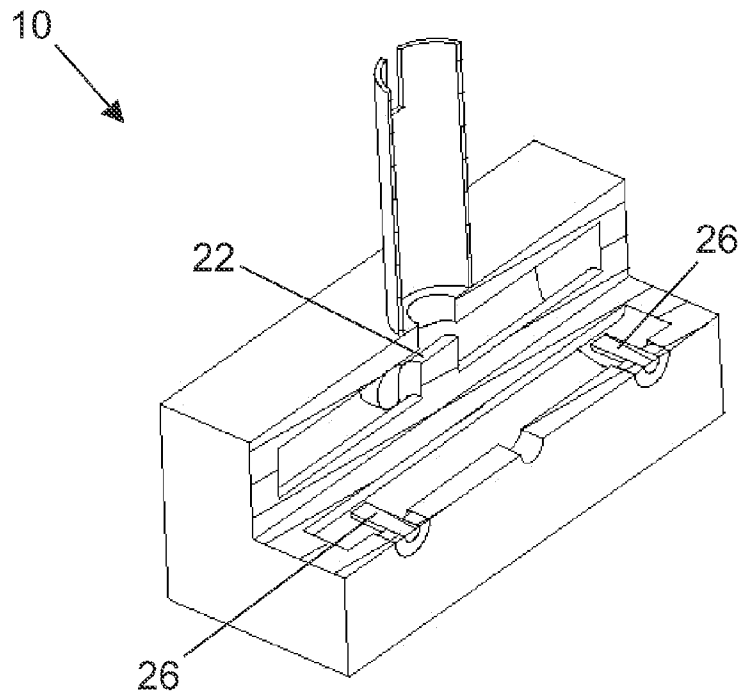


Fig. 19

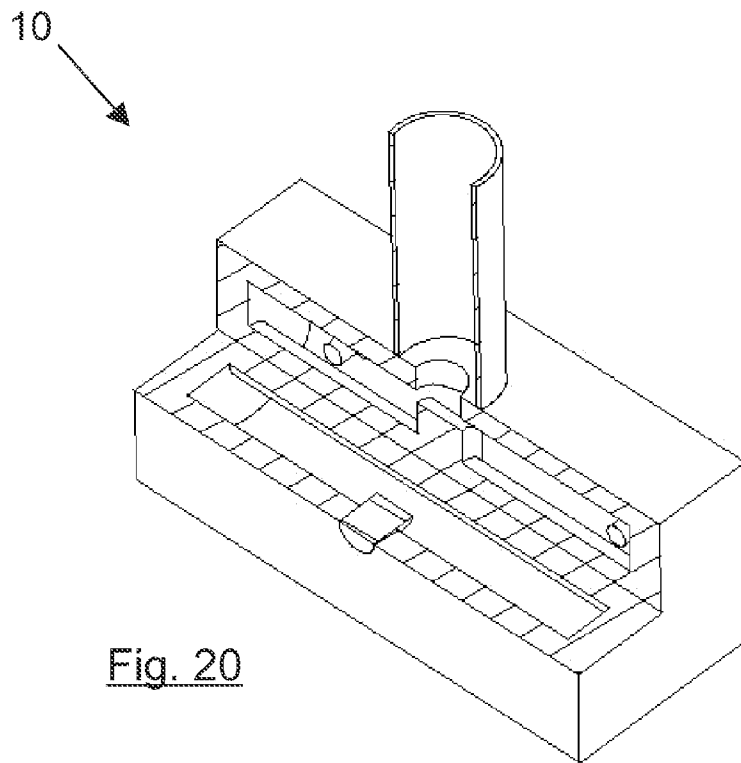


Fig. 20

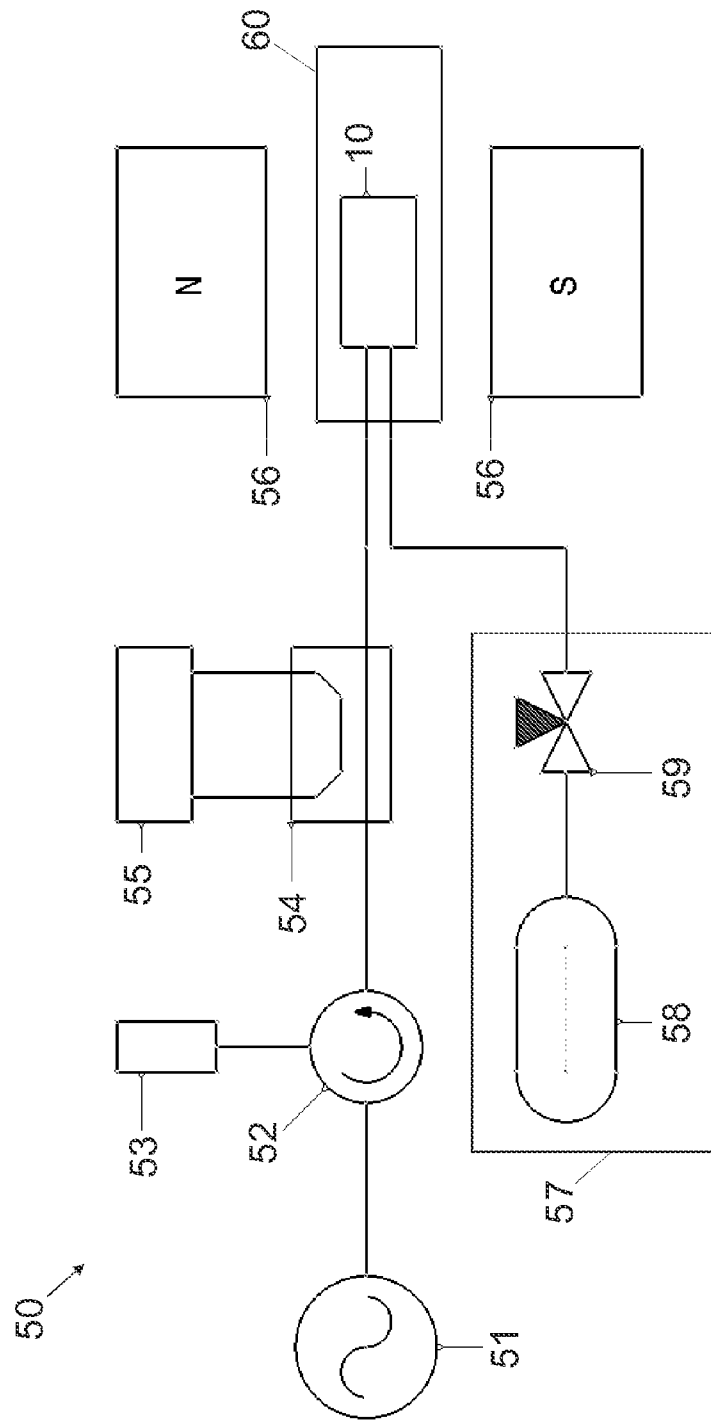


Fig. 21