

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 600 252**

51 Int. Cl.:

H05H 1/46 (2006.01)

H01J 37/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.10.2009 PCT/EP2009/064231**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.11.2016 WO2010049456**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2009 E 09740707 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.07.2016 EP 2353347**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma**

30 Prioridad:

30.10.2008 FR 0857392

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

08.02.2017

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS) (50.0%)
3, rue Michel-Ange
75016 Paris, FR y
UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**PELLETIER, JACQUES;
BECHU, STÉPHANE;
BES, ALEXANDRE y
LACOSTE, ANA**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 600 252 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

Dispositivo y procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma.

5 Campo general de la invención

La invención se refiere a un dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma, que comprende un recinto en cuyo volumen se produce o se confina el plasma, comprendiendo dicho recinto una pared que define una envuelta interior al recinto y que abarca el volumen.

10

La invención también se refiere a un procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma.

Estado de la técnica

15 El confinamiento de los plasmas en un volumen mediante imanes permanentes se utiliza desde hace muchos años de manera universal, debido al aumento de los rendimientos que permite en cuanto a densidad y uniformidad del plasma.

20 Desde 1974, la técnica no ha evolucionado, ya que el confinamiento del plasma se realiza de manera general colocando, en la periferia del volumen de confinamiento, en el interior o en el exterior de las paredes del recinto, unos imanes permanentes que presentan al plasma polaridades norte y sur alternadas, de ahí el nombre de confinamiento magnético multipolar.

25 Desde 1975, se realizó un estudio con el fin de determinar la mejor disposición y la distancia óptima entre imanes permanentes. Este estudio mostró que eran las estructuras continuas en línea, y no las estructuras en tablero de ajedrez o en línea interrumpida, las que proporcionaban el mejor confinamiento. Por el contrario, la distancia entre imanes, que presenta un máximo relativamente plano, parece ser menos crítica.

30 Finalmente, en 1992, el mejor conocimiento de los mecanismos de confinamiento magnético multipolar permitió proponer, para mejorar la eficacia del confinamiento, encerrar las estructuras magnéticas multipolares sobre sí mismas a modo de las estructuras de tipo "magnetron".

35 El principio del confinamiento multipolar del plasma, y en particular de los electrones que producen el plasma, parece bien conocido a partir de entonces. En efecto, las partículas cargadas que entran en la región de influencia de un campo magnético multipolar:

- 1) o bien son reflejadas por este campo magnético y reenviadas a la región exenta de campo magnético de la que procedían (mecanismo que se denominará "mecanismo 1");
- 40 2) o bien franquean la totalidad de la región de campo magnético en las regiones en las que su trayectoria es casi paralela a las líneas de campo magnéticas, ya que entonces no hay acoplamiento entre la partícula cargada y el campo magnético (mecanismo que se denominará "mecanismo 2"). Es el caso de las partículas cargadas que llegan de la zona sin campo magnético, o bien directamente hacia el polo de los imanes, o bien directamente a la zona de campo magnético de intensidad nula situada entre dos imanes de igual polaridad (caso de los imanes unitarios alternados);
- 45 3) o bien se atrapan en el campo magnético multipolar mediante mecanismo de colisiones (mecanismo que se denominará "mecanismo 3").

50 Dicho de otro modo, las únicas partículas cargadas que se pierden para el plasma son:

- por un lado las que son atrapadas en unas líneas de campo (mecanismo 3) que atraviesan unas superficies materiales, y
- 55 - por otro lado, las que llegan desde el volumen exento de campo magnético hacia las regiones de convergencia de las líneas de campo magnético (mecanismo 2), es decir o bien a los polos magnéticos (intensidad magnética máxima), o bien entre dos imanes de igual polaridad (intensidad magnética mínima nula). Estas zonas de convergencia de las líneas de campo magnético se denominan "picos" (o "cusps" en inglés).

60

Los electrones energéticos que producen el plasma (denominados electrones rápidos o primarios) son poco sensibles al campo eléctrico autoconsistente producido por la carga de espacio del plasma. Una vez atrapados en el campo magnético B_0 , tal como se muestra en la figura 1, en el intervalo entre dos colisiones elásticas o inelásticas, los electrones 6 oscilan entre dos puntos especulares M (en los que la intensidad del campo magnético es idéntica). Los puntos especulares M están situados frente a dos polos magnéticos opuestos de los imanes 3. Los electrones 6 oscilan entre los puntos M enrollándose alrededor de una línea 5 de campo media. Sus trayectorias permanecen

65

inscritas entre dos líneas de campo magnético de intensidad constante.

Al contrario que los electrones rápidos mencionados anteriormente (poco sensibles al campo eléctrico del plasma tal como se ha mencionado), los iones y los electrones poco energéticos del plasma (denominados electrones lentos o térmicos), que también oscilan entre dos polos magnéticos opuestos, sí son sensibles al campo eléctrico del plasma y se difunden en el campo magnético de manera colectiva, bajo la influencia de este campo eléctrico.

Finalmente, aparte de estos movimientos de oscilación y de difusión, las partículas cargadas se derivan a lo largo o alrededor de los imanes, perpendicularmente al plano que contiene el vector del campo magnético generado por la estructura magnética. Por este motivo resulta altamente preferible encerrar sobre sí mismas las estructuras de campo magnético (estructuras de tipo magnetrón, en anillo, en peine o en pista) con el fin de evitar las pérdidas de partículas cargadas en los extremos de las estructuras magnéticas continuas.

En las estructuras de confinamiento magnético multipolar, el plasma sería producido originalmente por electrones emitidos por filamentos termoemisores situados en el interior de la estructura de confinamiento y polarizados negativamente con respecto al recinto y a la estructura magnética.

De hecho, el plasma también se puede producir en el recinto o en su periferia mediante cualquier medio o método apropiado. De hecho, se puede concebir cualquier tipo de excitación del plasma, independientemente de la frecuencia de excitación y el modo de excitación (resonancia ciclotrónica de electrones (o RCE), descarga continua, descarga continua pulsada, descarga a baja frecuencia BF, descarga de radiofrecuencia RF, onda de superficie, descarga inductiva, descarga de magnetrón, etc.).

Incluso es posible utilizar las estructuras magnéticas de confinamiento para excitar el plasma, o bien mediante aplicación a la estructura de una tensión negativa continua o continua pulsada, de una tensión de BF o RF, o bien mediante aplicación de microondas para una excitación de tipo resonancia ciclotrónica de electrones distribuida (RCED).

Uno de los medios para confinar y producir plasmas de grandes dimensiones mantenidos por campos de HF, principalmente en el intervalo de las microondas (normalmente por encima del centenar de MHz), es distribuir fuentes elementales según redes de dos o tres dimensiones.

Fuentes de plasma microondas distribuidas según una red bidimensional permiten realizar fuentes planas (o torcidas de grandes dimensiones), mientras que fuentes distribuidas según una red tridimensional permiten, a modo de ejemplos no limitativos, producir volúmenes de plasma, por ejemplo en un reactor de geometría cilíndrica o esférica.

En los documentos FR 2 797 372, FR 2 838 020 y FR 2 840 451 se dan a conocer unos ejemplos de dispositivos.

Los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 020 dan a conocer unos dispositivos que permiten producir, a baja presión (de 10^2 a algunos pascales), plasmas planos o cilíndricos a partir de fuentes elementales mantenidas mediante microondas a la resonancia ciclotrónica de electrones (RCE). La producción del plasma mediante RCE requiere la presencia de un campo magnético que permite definir regiones en las que la frecuencia f_0 del campo eléctrico de microondas aplicado es igual a la frecuencia de rotación de los electrones en el campo magnético de amplitud B_0 , es decir

$$f_0 = eB_0/2\pi m_e \quad (1)$$

en la que m_e es la masa del electrón.

En los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 020, el campo magnético se produce por un imán permanente (dipolo magnético) fijado al extremo de un aplicador de microondas coaxial. Por este motivo, estos tipos de plasma se denominan plasmas multidipolares. En particular, y tal como se muestra en la figura 1, el documento FR 2 838 020 enseña a disponer imanes permanentes 3 a distancia de las paredes 1, gracias a vástagos 4, para evitar que las trayectorias 6 de los electrones se crucen con las paredes 1 y por tanto que se recojan sobre estas superficies.

La figura 1 muestra que el documento FR 2 838 020 propone una solución satisfactoria a nivel del confinamiento del plasma 10 ya que ninguna línea de campo 5 se encuentra con ninguna superficie o pared 1, evitando así pérdidas directas de electrones sobre las paredes.

Por el contrario, la producción de plasma mediante RCE, tal como se describe en los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 020, presenta inconvenientes principales en función de las condiciones de funcionamiento de las fuentes elementales, a saber:

- 1) el plasma 10 se produce preferentemente en la parte cilíndrica alrededor del imán 3, y no en la cara delantera del imán, tal como se prefiere en numerosas aplicaciones;

2) el campo de presión de esta técnica está limitado a las bajas presiones, normalmente al pascal (10 mtorr), ya que a presiones superiores, el plasma se produce entonces esencialmente en la cara trasera del imán 3, y no en la cara delantera, lado de utilización. La técnica de producción de plasma se encuentra por tanto limitada al campo de las bajas presiones;

3) en el caso de una fuente de plasma no plana (reactor cilíndrico), el hecho de poner los imanes permanentes a distancia de las paredes reduce el volumen útil de plasma en el reactor.

Tal como se muestra en la figura 2, el documento FR 2 840 451 da a conocer, por su parte, una fuente de plasma plana en la que las microondas se aplican al plasma mediante aplicadores 9 de propagación coaxiales que se terminan según una sección recta. Al estar estos aplicadores 9 generalmente distribuidos según una red cuadrada, estos tipos de plasma 10 se denominan plasmas matriciales. En principio, el campo de presión considerado (de 10 a 10^3 pascales) no requiere campo magnético, pero el documento FR 2 840 451 enseña la posibilidad de disponer un imán 3 en el alma central 11 del aplicador. En este caso, las líneas 5 de campo magnético se cierran un bucle sobre las paredes 1 metálicas o dieléctricas del recinto. En este caso, todos los electrones acelerados en la RCE se recogen en el aplicador coaxial 9, lo cual resulta catastrófico desde el punto de vista del balance de potencia del plasma. El confinamiento del plasma resulta ineficaz, sirviendo el imán 3 únicamente para proporcionar las condiciones de RCE indispensables para obtener la ruptura del plasma 10 a bajas presiones (del orden de un pascal a algunas decenas de pascales).

Por estos motivos, el documento WO 2008/009559 propuso remediar todos los inconvenientes anteriores.

Para ello, la solución propuesta por el documento WO 2008/009559 consiste en distribuir en el recinto

- o bien unos imanes anulares de imantación radial, dispuestos en la periferia del plasma (confinamiento del plasma),
- o bien unas fuentes elementales en las que un imán anular de imantación radial se coloca en el extremo de la estructura coaxial de llegada de las microondas.

La distribución de los imanes o de las fuentes que comprenden los imanes se realiza según redes bi o tridimensionales, por ejemplo rectangulares o hexagonales, tal como se muestra en las figuras 3A y 3B,

Sólo las líneas 5 de campo magnético en la parte delantera de un plano 15 medio de los imanes 30 están situadas en el lado del plasma 10, tal como se muestra por ejemplo en las figuras 4A y 4B.

Con este tipo de configuración magnética, las líneas 5 de campo no atraviesan nunca el plano 15 medio del imán y las zonas de RCE rodean generalmente el imán 30, lo cual permite aliviar el conjunto de los inconvenientes descritos en el análisis del estado de la técnica, a saber:

- 1) las líneas 5 de campo no atraviesan ninguna superficie o pared 1 (la configuración de las líneas 5 de campo de cada imán permanente 30 hace que vayan de un polo al polo opuesto sin atravesar nunca el plano 15 medio del imán 30), y por tanto los electrones atrapados alrededor de estas líneas 5 de campo permanecen bien confinados;
- 2) si el imán 30 presenta una imantación suficiente, las condiciones de RCE se verifican y las líneas 5 de campo se sitúan en la cara delantera de la estructura coaxial, de ahí una producción del plasma hacia el volumen útil frente al aplicador;
- 3) el dispositivo del documento WO 2008/009559 permite una producción de plasma denso en un gran campo de presión (desde 10^{-2} pascales hasta 10^3 pascales, con un mismo aplicador 9 y con una eficacia de acoplamiento máxima),
 - o bien con un acoplamiento de RCE (acoplamiento resonante),
 - o bien con un acoplamiento mediante absorción por colisiones cuando el campo magnético se vuelve inoperativo, es decir cuando la frecuencia ν de colisiones elásticas de los electrones se vuelve grande con respecto a la pulsación del campo eléctrico de microondas, igual, en la RCE, a la pulsación ciclotrónica de electrones ω_c ($\nu \gg \omega_c$).

Así, el campo magnético no altera el acoplamiento mediante absorción por colisiones, que toma el relevo de la RCE cuando aumenta la presión.

El documento WO 2008/009559 permite la extensión de la escala del confinamiento y de la producción de plasma. En efecto, no hay ninguna limitación teórica, incluso tecnológica, para aumentar el número de aplicadores, o bien

sobre una superficie plana, o bien sobre una superficie no plana, por ejemplo cilíndrica.

La figura 13A muestra las líneas iso-B (trazos discontinuos) y las líneas de campo (trazos continuos) para imanes de imantación radial para estructuras cilíndricas (radio $R = 10$ mm, altura $Z = 20$ mm) en SmCo.

Las líneas iso-B se retoman en la figura 14A (trazos discontinuos) y las líneas de campo se retoman en la figura 14B (trazos discontinuos).

En cambio, el dispositivo del documento WO 2008/009559 también presenta inconvenientes. Los imanes de imantación radial son difíciles de encontrar en el comercio, ya que su realización es difícil, sobre todo si las dimensiones de los imanes son pequeñas, en particular a nivel del diámetro interior del imán.

El dispositivo del documento WO 2008/009559 comprende estructuras magnéticas compuestas que asocian diferentes tipos de imantación. Ahora bien la realización de estructuras magnéticas compuestas que asocian diferentes tipos de imantación disminuye la compacidad de cada fuente. Además, tales estructuras compuestas pueden resultar muy difíciles, incluso imposibles, de realizar desde el punto de vista técnico. Por ejemplo en el caso de una estructura radial, la realización de una estructura cilíndrica tal como se representa en la figura 13A requiere el ensamblaje mediante adhesión de varios sectores, de ahí la gran dificultad, incluso imposibilidad, de realizar determinadas estructuras muy compactas o compuestas.

Un inconveniente principal de las estructuras de imantación radial (véase la figura 13A) es que las líneas de igual intensidad de campo magnético (líneas iso-B) están situadas preferentemente a ambos lados de las caras opuestas de la estructura magnética radial. En este caso, una parte importante de la potencia de microondas en la salida del aplicador (figura 14A) puede ser irradiada fuera del aplicador sin encontrar las condiciones de resonancia ciclotrónica de electrones (RCE), de ahí un acoplamiento no optimizado de las microondas con el plasma.

Además, a partir del documento WO 2008/009558 se conoce un dispositivo de producción y de confinamiento de un plasma en un volumen. En el dispositivo del documento WO 2008/009558 la configuración magnética comprende imperativamente por lo menos un par de imanes permanentes concéntricos de imantación axial, imanes cuyas imantaciones son imperativamente alternas. Por tanto, la disminución de las pérdidas en el plasma no es óptima, ya que determinadas líneas de campo alcanzan los polos opuestos de los dos imanes concéntricos o de un mismo imán.

Descripción de la invención

La invención tiene como objetivo resolver por lo menos uno de los inconvenientes mencionados anteriormente.

Para ello, se propone según la invención un dispositivo según la reivindicación 1.

La invención se completa ventajosamente mediante las características de las reivindicaciones 2 a 9.

La invención también se refiere a un procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma en un dispositivo mencionado anteriormente.

La invención presenta numerosas ventajas.

Debido a que el conjunto magnético está compuesto por imanes únicamente de dirección de imantación axial, la estructura magnética con imán permanente es mucho más sencilla de realizar, al tiempo que puede producir configuraciones magnéticas en las que las líneas de campo no atraviesan nunca el plano medio del imán ni las paredes del recinto.

La invención permite un confinamiento de plasmas densos de grandes dimensiones, desde las presiones más bajas (10^{-2} pascales o menos) hasta la decena de pascales (presión a la que el confinamiento magnético se vuelve ineficaz). También se puede trabajar en un campo grande de presión, o bien con un acoplamiento de RCE, o bien con un acoplamiento mediante absorción por colisiones cuando el campo magnético se vuelve inoperativo, es decir cuando la frecuencia ν de colisiones elásticas de los electrones se vuelve grande con respecto a la pulsación $\omega_0 = 2\pi f_0$ del campo eléctrico de microondas ($\nu \gg \omega_0$), igual, en la RCE, a la pulsación ciclotrónica de electrones ω_c ($\omega_0 = \omega_c$).

La invención propuesta puede encontrar aplicaciones muy numerosas, en particular en el campo de los tratamientos de superficie, tales como el gravado, los depósitos (PACVD o PAPVD), la implantación iónica por inmersión en plasma, por mencionar sólo algunos ejemplos. También se puede mencionar la aplicación de la invención a la iluminación. En lo que se refiere a la aplicación a la iluminación, la invención aporta ventajas importantes con respecto a los dispositivos actuales conocidos. En efecto, los plasmas producidos según la invención pueden ser producidos con potencias muy bajas (del orden del W), sin retraso en el encendido (encendido inmediato), y sin radiación de microondas (absorción total de las microondas), todo ventajas con respecto a las lámparas de bajo

consumo actuales que utilizan frecuencias de RF mucho más bajas.

La invención permite la producción de plasma en el campo de presión que va de 10^{-3} a aproximadamente 10^3 pascales, es decir del orden de 10^{-5} a 10 torr (1 torr = 133 pascales) con vistas a aplicaciones:

- en los tratamientos de superficies (limpieza, esterilización, gravado, depósito, implantación iónica, etc.),
- en la producción de especies nuevas (átomos, radicales, compuestos metaestables, especies cargadas, fotones),
- en la realización de fuentes de iones para cualquier aplicación que necesite haces de iones (fuentes de iones mono o multicargadas), así como
- en cualquier campo que necesite la producción, sobre grandes superficies o grandes volúmenes, de plasma uniforme.

Otra ventaja aportada por la invención es la posibilidad de realizar una estructura de confinamiento en la que las líneas de campo magnético están todas situadas en el mismo semiespacio, de ahí un confinamiento ideal del plasma en el campo de las bajas presiones.

En efecto, con este tipo de configuración magnética, las líneas de campo no atraviesan nunca el plano medio del imán y las zonas de RCE rodean generalmente el imán, lo cual permite aliviar los inconvenientes del estado de la técnica, a saber:

- 1) las líneas de campo no atraviesan ninguna superficie o pared, y por tanto los electrones atrapados alrededor de estas líneas de campo permanecen bien confinados;
- 2) si el imán presenta una imantación suficiente, las condiciones de RCE y las líneas de campo se sitúan en la cara delantera de la estructura coaxial, de ahí una producción del plasma hacia el volumen útil.

Ya no hay ninguna disminución del volumen útil de plasma en el reactor, ya que ventajosamente el dispositivo no comprende ningún vástago que soporte los imanes hacia el interior del recinto.

Otra ventaja aportada por la invención es la extensión de la escala del confinamiento y de la producción de plasma. En efecto, no hay ninguna limitación teórica, incluso tecnológica, para aumentar el número de aplicadores, o bien sobre una superficie plana, o bien sobre una superficie no plana, por ejemplo cilíndrica. Es posible alimentar con potencia de microondas tantos aplicadores como se desee mediante tantos generadores independientes como sea necesario, con o sin división de potencia. Cada aplicador puede ser alimentado con ayuda de un cable coaxial ya que la potencia de microondas necesaria para cada aplicador es relativamente pequeña, de ahí la gran fiabilidad del dispositivo global.

Otra ventaja es la posibilidad de producir plasmas densos en todo el intervalo de presión definido en la invención, desde 10^{-2} pascales hasta 10^3 pascales con el mismo aplicador, y con una eficacia de acoplamiento máxima. En efecto, gracias a la invención, es posible mantener el plasma tanto en el régimen de RCE (acoplamiento resonante) como en el campo fuera de RCE, a una presión más alta (acoplamiento mediante absorción por colisiones).

Otra ventaja es que, para imanes comerciales y condiciones operatorias convencionales (por ejemplo, una frecuencia de microondas $f_0 = 2,45$ GHz), las líneas de intensidad de campo magnéticos B_0 rodean completamente cada imán de tal manera que las microondas no pueden ser irradiadas fuera de la zona del aplicador sin atravesar una zona de acoplamiento de RCE, de ahí un acoplamiento óptimo de las microondas con un plasma a baja y a muy baja presión.

Para la RCE, es posible utilizar frecuencias de microondas (5,8 GHz, 2,45 GHz, 920 MHz), pero también frecuencias más bajas (hasta el centenar de MHz).

Para cada fuente elemental, se pueden prever unas alimentaciones unitarias mediante transistores de potencia, incluido a 2,45 GHz, incluso 5,8 GHz.

La figura 13B muestra las líneas iso-B (trazos discontinuos) y las líneas de campo (trazos continuos) para imanes de imantación axial pie contra cabeza (es decir que el conjunto es sustancialmente simétrico con respecto a la envuelta) según la invención para estructuras cilíndricas (radio $R = 10$ mm, altura $Z = 20$ mm) en SmCo.

Las líneas iso-B se retoman en la figura 14A (trazos continuos) y las líneas de campos se retoman en la figura 14B (trazos continuos). La figura 14A indica las condiciones de RCE para microondas a 2,45 GHz (875 Gauss o 0,0875 Tesla) para la estructura de imantación radial (línea discontinua) y la de imantación axial pie contra cabeza (línea en trazos continuos) para estructuras magnéticas de samario-cobalto de iguales dimensiones (altura $Z = 20$

mm, radio $R = 10$ mm).

5 Otra ventaja es que las estructuras magnéticas según la invención son muy compactas. En efecto, para obtener densidades muy elevadas a partir de fuentes de plasma de dimensiones muy grandes, es necesario poder ensamblar sobre una superficie dada el mayor número de aplicadores por unidad de superficie, con el fin de poder acoplar al plasma la mayor densidad de potencia de microondas por unidad de superficie. Además, la realización de estructuras magnéticas que presentan un único tipo de imantación aumenta la compacidad de cada fuente y garantiza la posibilidad de su realización técnica.

10 Otra ventaja es por tanto la facilidad de realización de una estructura magnética según la invención. En la invención, la realización de una estructura pie contra cabeza (es decir simétrica con respecto a la envuelta) es muy fácil ya que basta con adherir dos imanes de imantaciones opuestas (véase la figura 13B).

15 Otra ventaja se refiere a la configuración magnética generada por la estructura magnética. En la invención, aunque las líneas de campo presentan un aspecto similar en los dos casos (imantación radial e imantación axial pie contra cabeza) tal como se indica en la figura 14B, las líneas de igual intensidad de campo magnético (líneas iso-B) rodean completamente la estructura magnética (figuras 13B y 14A). En este caso, la potencia de microondas en la salida del aplicador (figura 14A) no puede irradiar fuera del aplicador sin encontrarse con las condiciones de RCE, de ahí un acoplamiento perfectamente optimizado de las microondas en el plasma.

20

Descripción de las figuras

25 Otras características, objetivos y ventajas de la invención se desprenden de la siguiente descripción, que es puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe leerse con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

25

las figuras 1 y 2, ya comentadas, representan esquemáticamente montajes según la técnica anterior;

las figuras 3A y 3B representan esquemáticamente dos ejemplos posibles de redes bidimensionales;

30 las figuras 4A y 4B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un modo de realización conocido;

35 las figuras 5A y 5B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un primer modo de realización posible de la invención;

las figuras 6A y 6B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un segundo modo de realización posible de la invención;

40 las figuras 7A y 7B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un tercer modo de realización posible de la invención;

las figuras 8A y 8B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un cuarto modo de realización posible de la invención;

45 las figuras 9A y 9B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un quinto modo de realización posible de la invención;

50 las figuras 10A y 10B representan esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección y una vista de frente de un sexto modo de realización posible de la invención;

la figura 11 representa esquemáticamente de manera respectiva una vista en sección de un séptimo modo de realización posible de la invención;

55 las figuras 12A a 12C representan esquemáticamente secciones de modos de realización posibles de un aplicador según la invención;

60 las figuras 13A y 13B representan esquemáticamente líneas de campo (trazos continuos) e iso-B (trazos discontinuos) respectivamente para una estructura magnética de imantación radial y para una estructura magnética de imantación axial pie contra cabeza (simétrica con respecto a la envuelta);

65 la figura 14A representa las líneas iso-B para las condiciones de RCE para microondas a 2,45 GHz (875 Gauss o 0,0875 Tesla) para la estructura de imantación radial (línea discontinua) y la de imantación axial pie contra cabeza (línea en trazos continuos) para estructuras magnéticas de samario-cobalto (imantación idéntica) de iguales dimensiones (altura $Z = 20$ mm, radio $R = 10$ mm); y

la figura 14B representa las líneas de campo para las condiciones de RCE para microondas a 2,45 GHz (875

Gauss o 0,0875 Tesla) para la estructura de imantación radial (línea discontinua) y la de imantación axial pie contra cabeza (línea en trazos continuos) para de las estructuras magnéticas de samario-cobalto (imantación idéntica) de iguales dimensiones (altura $Z = 20$ mm, radio $R = 10$ mm).

5 En todas las figuras, los elementos similares llevan referencias numéricas idénticas.

Descripción detallada

10 Con el fin de conferir a una estructura magnética multipolar una gran eficacia de confinamiento y/o de producción para los plasmas, se propone según la invención hacer que las trayectorias de las partículas cargadas procedentes del plasma y atrapadas alrededor de una línea de campo magnético no se encuentren con paredes (pérdidas mediante el mecanismo 3).

15 Para ello, es preciso que las trayectorias de los electrones atrapados estén libres de cualquier obstáculo entre dos puntos especulares M de igual intensidad de campo magnético.

Por tanto, según la invención se propone un dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma 10, visible más particularmente en las figuras 5A a 12C.

20 Tal como se muestra en las figuras 5A, 6A, 7A, 8A, 9A, 10A y 11 por ejemplo, el dispositivo comprende principalmente un recinto 13 en cuyo volumen se produce o se confina el plasma 10.

El recinto 13 comprende una pared 1 que define una envuelta 15 interior al recinto y que abarca el volumen.

25 A continuación en la presente descripción, se denomina "recinto" al recipiente en cuyo volumen se produce o se confina el plasma 10, pudiendo un mismo dispositivo dividirse así en varios recintos, por ejemplo mediante tabiques internos o paredes complementarias que separan el dispositivo.

30 La envuelta corresponde a la superficie de la pared 1 interna al recinto 13.

El dispositivo comprende por lo menos un conjunto 30 de producción y/o de confinamiento del plasma.

35 Cada conjunto 30 está compuesto por imanes 3 únicamente de dirección de imantación axial dispuestos con respecto a la envuelta 15, de manera que la dirección de imantación de todos los imanes 3 que componen cada conjunto 30 sea sustancialmente perpendicular a la envuelta 15.

Además, cada conjunto 30 está hundido en la pared 1 que define la envuelta 15, y los imanes 3 están dispuestos entre sí de manera que el conjunto 30 sea sustancialmente simétrico con respecto a la envuelta 15.

40 Con esta configuración, las líneas 5 de campo magnético no atraviesan la pared 1 del recinto.

45 Se comprende que si el conjunto 30 no es perfectamente simétrico con respecto a la envuelta 15, es decir que el conjunto 30 está ligeramente demasiado hundido en la pared, o ligeramente demasiado poco hundido en la pared, el dispositivo según la invención también funciona, pero con un rendimiento más bajo, teniendo en cuenta que algunas líneas de campo atraviesan la pared del recinto y que se perderán electrones para el plasma 10.

Las figuras 5A y 5B muestran esquemáticamente que el conjunto 30 comprende dos imanes anulares 3 simétricos con respecto a la envuelta 15.

50 Una configuración de este tipo del conjunto 30 permite realizar un confinamiento del plasma, sin que las trayectorias 6 de los electrones atrapados se encuentren con una pared 1 del recinto.

55 De una manera general, cada imán anular 3 comprende principalmente una imantación axial, y el conjunto 30 presenta una simetría con respecto a un plano perpendicular a la dirección de imantación axial, que se podrá denominar un plano medio 50 del conjunto 30. Para un mejor rendimiento, se hacen coincidir el plano 50 y la envuelta 15 durante el montaje del conjunto 30 en la pared 1.

60 Tal como se muestra en las figuras 6A y 6B, para realizar una producción de plasma 10, el conjunto 30 puede comprender además por lo menos una fuente elemental de plasma que comprende un aplicador coaxial 9 de microondas.

El aplicador 9 atraviesa la pared 1 del recinto y comprende un alma central 11.

65 Cada imán anular 3 está centrado en el alma central 11 del aplicador 9. Los imanes anulares 30 de imantación axial se colocan alrededor de un extremo libre 90 del aplicador coaxial de llegada de las microondas y están hundidos en la pared 1 del recinto en la periferia externa del aplicador 9.

En el caso del confinamiento y/o de producción, sólo las líneas de campo magnético 5, en la parte delantera del plano longitudinal medio 50 del conjunto 30, están situadas en el lado del plasma 10, tal como se muestra en las figuras 5A y 6A.

5 El dispositivo de las figuras 6A y 6B en particular permite resolver las dificultades de la técnica anterior.

10 En efecto, el plasma se confina de manera eficaz. Se puede producir frente al aplicador 9. Además, el campo magnético B_0 no altera el acoplamiento mediante absorción por colisiones, que toma el relevo de la RCE cuando aumenta la presión. En efecto, la configuración de las líneas 5 de campo del conjunto 30 hace que estas últimas vayan de un polo al polo opuesto sin atravesar nunca el plano medio 50 del conjunto 30.

15 El aplicador coaxial 9 comprende preferentemente un material dieléctrico 7 dispuesto alrededor del alma central 11, a nivel de la pared 1 del recinto (véase también la figura 12A). El material dieléctrico 7 puede estar dispuesto debajo del nivel de la pared (véanse las figuras 12B y 12C).

20 El extremo libre 90 del aplicador puede presentar varias formas posibles. A modo de ejemplo no limitativo, el extremo libre 90 puede presentar una sección recta más importante que la sección recta del alma central 11 (véanse las figuras 12B y 12C). El aplicador comprende entonces preferentemente obstáculos 91 realizados en la pared 1, de manera que, por un lado, el espacio entre el alma central 11 y la pared sea siempre sustancialmente idéntico y, por otro lado, se evite una metalización del material dieléctrico 7 en las aplicaciones del dispositivo para la pulverización de metales (el material 7 queda protegido por el extremo libre 90).

25 En el caso de la figura 12C, el diámetro interno del conjunto 30 es superior al diámetro externo del extremo libre 90.

En el caso de la figura 12B, el extremo libre 90 está situado por encima de la pared 1. Entonces puede recubrir el conjunto 30, por ejemplo situado en el interior del alma central 11, pero siempre de manera que sea simétrico con respecto a la envuelta 15.

30 El material 7 está preferentemente dispuesto por lo menos sobre una parte de la longitud del aplicador 9.

El material dieléctrico también puede estar formado mediante vacío a baja y a muy baja presión (lo cual corresponde a las condiciones de funcionamiento del dispositivo).

35 Un dispositivo según la invención, para realizar un dispositivo de confinamiento de un plasma 10 de grandes dimensiones, comprende, según redes bi o tridimensionales, una pluralidad de conjuntos 30 de imantación axial, dispuestos en la periferia del plasma 10. Cuanto más densa es la red de conjuntos 30, más denso es el plasma y más localizado está hacia el centro del volumen del recinto.

40 El dispositivo también puede comprender una pluralidad de conjuntos 30 que comprenden cada uno un aplicador 9.

Cada red bi o tridimensional es por ejemplo rectangular o cuadrada, tal como se muestra en la figura 3A, o hexagonal, tal como se muestra en la figura 3B.

45 Así, para conjuntos distribuidos según redes bi o tridimensionales, el dispositivo presenta una estructura magnética:

- por un lado que genera, mediante RCE (es decir que puede suministrar el campo magnético de intensidad B_0 necesario para el acoplamiento de RCE), un plasma 10 esencialmente en la dirección frente a los aplicadores 9, y,
- por otro lado que permite, según la forma del extremo libre 90 del aplicador 9, un funcionamiento en un gran campo de presiones, o bien mediante acoplamiento de RCE del campo eléctrico de microondas con los electrones (acoplamiento resonante), o bien, a presión más alta, mediante acoplamiento por absorción por colisiones, cuando el campo magnético se vuelve inoperativo.

55 Cada conjunto puede presentar una polaridad cualquiera en el plasma, pero los conjuntos 30 distribuidos según redes bi o tridimensionales presentan en el plasma 10 preferentemente todos el mismo sentido de imantación axial, con respecto a las paredes 1 o a los aplicadores 9 a los que rodean, para evitar que líneas de campo magnético de un conjunto cierren un bucle sobre el polo opuesto de otro conjunto atravesando el plano medio 50 del conjunto, y como consecuencia atravesando una pared 1 del recinto.

60 Se puede alimentar sólo una parte de los conjuntos 30 (un conjunto 30 de cada dos, o una fila de cada dos de los conjuntos 30, a modo de ejemplos no limitativos) con microondas mediante un aplicador 9.

65 La invención puede presentar numerosas variantes con respecto a las configuraciones propuestas en las figuras 5A a 6B. Estas variantes se refieren en particular a la posición del conjunto 30 con respecto al aplicador coaxial 9 y/o a

la forma del extremo libre 90 del aplicador (figura 12).

5 Las figuras 7A y 7B muestran que el conjunto 30 de confinamiento puede estar compuesto por una barra que comprende dos imanes 3 de imantación axial, hundida en la pared 1 del recinto y dispuesta para ser simétrica con respecto a la envuelta 15 (se debe observar que, en este caso, el conjunto 30 presenta en el plasma una polaridad opuesta a la presentada en el plasma en las figuras 5 y 6 por ejemplo, lo cual, se recuerda, no tiene importancia para un dispositivo que comprende un único conjunto).

10 Las figuras 8A y 8B muestran que el conjunto 30 según las figuras 7A y 7B puede comprender además un aplicador 9, pudiendo los imanes 3 de dirección de imantación axial estar entonces hundidos en el alma central 11 de un aplicador 9.

15 Las figuras 9A y 9B muestran que cada conjunto 30 puede comprender dos imanes circulares 3 simétricos con respecto a la envuelta 15, centrados alrededor de dos imanes 3 en forma de barras, también simétricos con respecto a la envuelta 15.

20 Tal como se puede constatar en las figuras 9A y 9B, preferentemente todos los imanes 3 presentan en el plasma 10 el mismo sentido de imantación axial con respecto a las paredes 1, para evitar que líneas de campo magnético de un imán 3 cierren un bucle sobre el polo opuesto de otro imán 3 atravesando el plano medio 50 del conjunto. Los trazos discontinuos muestran que el aplicador 9 es opcional en el conjunto 30, en función de las aplicaciones elegidas.

25 Las figuras 10A y 10B muestran que se pueden superponer unos imanes 3 sobre otros imanes 3 del conjunto 30, con la condición de que el conjunto 30 siga siendo simétrico con respecto a la envuelta 15.

La figura 11 muestra que se puede interponer un elemento 16 de gran permeabilidad magnética (por ejemplo un bloque de hierro dulce) o de baja permeabilidad magnética relativa (por ejemplo igual a 1) entre los dos imanes 3 del conjunto 30, con la condición de que el conjunto 30 siga siendo simétrico con respecto a la envuelta 15.

30 El elemento 16 permite acondicionar las líneas 5 de campo y alejarlas de las paredes del recinto.

35 Estas variantes, presentadas a modo de ejemplos no limitativos, permiten la optimización de las fuentes de plasma elementales en función de la aplicación o del procedimiento previstos (simple confinamiento del plasma o confinamiento y producción de plasma, campo de presión útil, etc.). En particular, para evitar, en determinadas condiciones de funcionamiento, el acoplamiento del plasma en la estructura coaxial, con frecuencia es preferible, tal como se ha visto, utilizar un aplicador relleno total o parcialmente de material dieléctrico 7.

40 Los imanes 3 anulares de los conjuntos 30 también pueden presentar formas variadas: circular, poligonal (cuadrada, hexagonal, octogonal, decagonal, etc.). Pero la forma anular circular es con diferencia la más común y la más sencilla de poner en práctica.

Asimismo, la barra de la figura 7 presenta preferentemente simetría de revolución, pero puede presentar otras geometrías.

45 Evidentemente, el confinamiento y la producción de plasmas muy densos (más allá de 10^{10} cm^{-3}) necesitan el enfriamiento de las estructuras magnéticas y coaxiales, por ejemplo mediante una circulación 17 de un fluido caloportador gaseoso o líquido (tal como se representa en la figura 10, por ejemplo).

50 Con la tecnología descrita, es posible realizar o bien fuentes planas de grandes dimensiones, o bien fuentes y/o recintos cilíndricos o esféricos, según la aplicación prevista.

55 La frecuencia de microondas utilizada no resulta crítica y por tanto es posible utilizar una de las frecuencias de ISM tales como 915 MHz o 2,45 GHz, incluso 5,8 GHz. Para una excitación del plasma a la resonancia ciclotrónica de electrones mediante microondas a 2,45 GHz, la condición de resonancia ($B_0=0,0875$ Tesla) se cumple fácilmente por imanes permanentes convencionales, tales como de samario-cobalto, incluso de ferrita de bario o de ferrita de estroncio. Más aún a 100, 200 o 300 MHz, a las que el coste de los transistores de potencia es mucho menor que a 915 MHz o 2,45 GHz. Evidentemente, las frecuencias dadas a modo de ejemplo no son limitativas.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma (10), que comprende un recinto (13) en cuyo volumen se produce y/o se confina el plasma, comprendiendo dicho recinto (13) una pared (1) que define una envuelta (15) interior al recinto y que abarca el volumen, comprendiendo dicho dispositivo a continuación

- por lo menos un conjunto (30) de producción y/o de confinamiento del plasma, estando cada conjunto (30) compuesto por imanes (3) únicamente de dirección de imantación axial, y hundido en la pared (1) que define la envuelta,

de manera que la dirección de imantación de todos los imanes (3) que componen cada conjunto (30) sea sustancialmente perpendicular a la envuelta (15) definida por la pared (1),

estando dicho dispositivo caracterizado por que el conjunto (30) es sustancialmente simétrico con respecto a la envuelta, no atravesando las líneas (5) de campo magnético la pared (1) del recinto.

2. Dispositivo según la reivindicación 1, que comprende una pluralidad de conjuntos (30) dispuestos en la pared (1) para formar una red bidimensional o tridimensional.

3. Dispositivo según la reivindicación 2, en el que la red es cuadrada o hexagonal.

4. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que por lo menos un conjunto (30) comprende además por lo menos una fuente elemental de plasma que comprende un aplicador coaxial (9) de microondas que comprende un alma central (11), atravesando el aplicador (9) la pared (1) del recinto.

5. Dispositivo según la reivindicación 4, en el que el conjunto (30) comprende unos imanes (3) de dirección de imantación axial hundidos en el alma central (11) del aplicador.

6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 o 5, en el que el conjunto (30) comprende unos imanes de dirección de imantación axial hundidos en la pared del recinto en la periferia externa del aplicador (9).

7. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el conjunto (30) comprende un elemento (16) de hierro dulce o con permeabilidad magnética relativa igual a 1.

8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 7, en el que el aplicador coaxial comprende un material dieléctrico (7) dispuesto alrededor del alma central (11), por lo menos sobre una parte de la longitud del aplicador, o comprende vacío a baja y a muy baja presión.

9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 8, en el que cada imán (3) suministra un campo magnético de amplitud B_0 que verifica la relación

$$f_0 = eB_0/2\pi m_e$$

en la que:

f_0 es la frecuencia del campo eléctrico de microondas aplicado por el aplicador coaxial (9),
 e es la carga electrónica, y
 m_e es la masa del electrón,

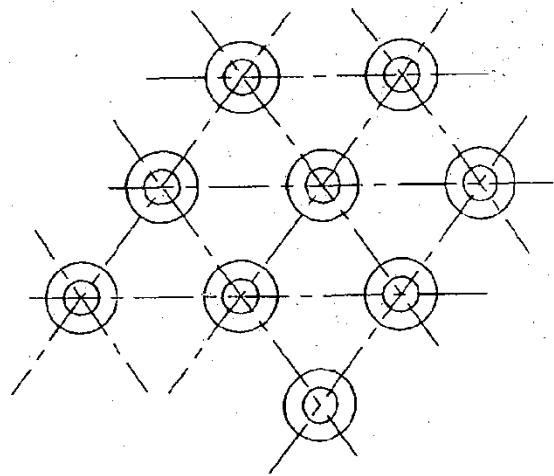
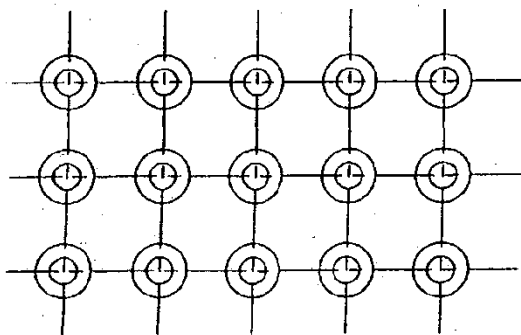
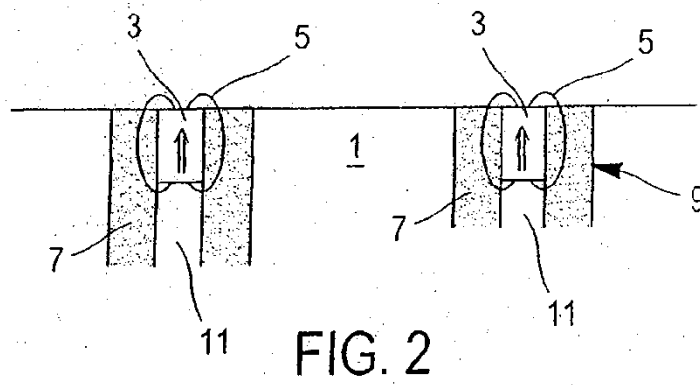
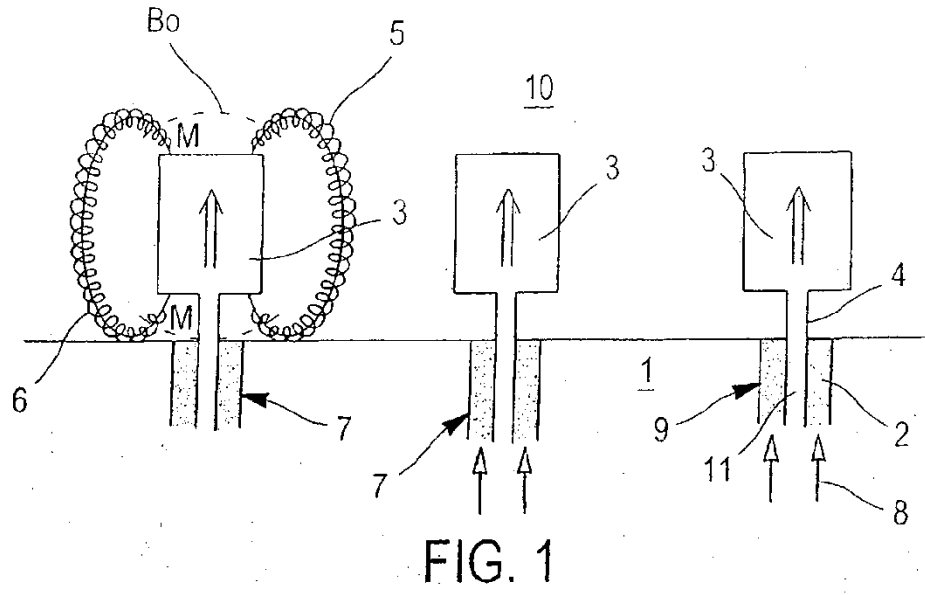
para permitir la producción del plasma a baja presión mediante resonancia ciclotrónica de electrones.

10. Procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma (10) en un recinto (13), recinto (13) en cuyo volumen se produce y/o se confina el plasma, comprendiendo dicho recinto (13) una pared (1) que define una envuelta (15) interior al recinto y que abarca el volumen,

estando dicho procedimiento caracterizado por que comprende una etapa según la cual se proporciona por lo menos un conjunto (30) de producción y/o de confinamiento del plasma, estando cada conjunto (30)

compuesto por imanes únicamente de dirección de imantación axial, y hundido en la pared (1) que define la envuelta,

de manera que la dirección de imantación de todos los imanes que componen cada conjunto (30) sea sustancialmente perpendicular a la envuelta y que el conjunto (30) sea sustancialmente simétrico con respecto a la envuelta definida por la pared (1), atravesando así las líneas de campo magnético al mínimo la pared (1) del recinto.



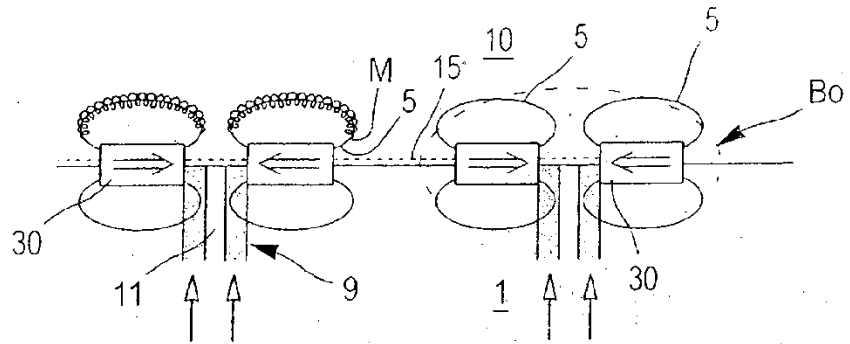


FIG. 4A

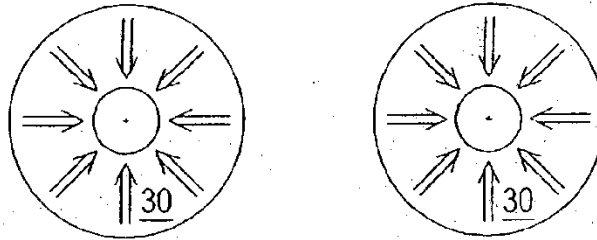


FIG. 4B

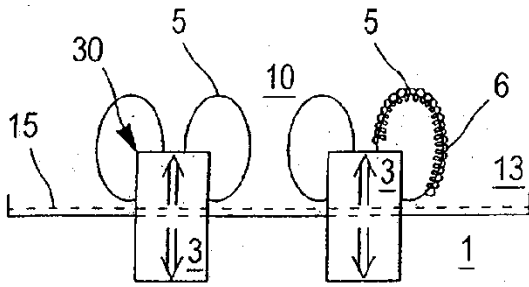


FIG. 5A

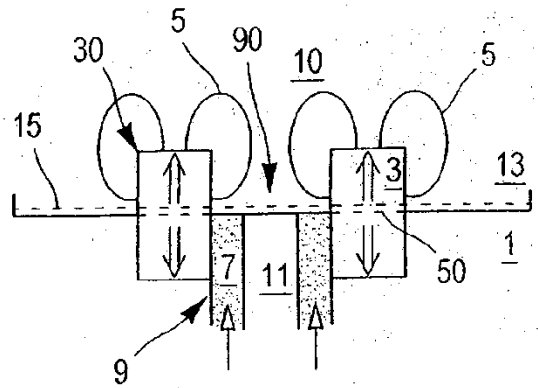


FIG. 6A

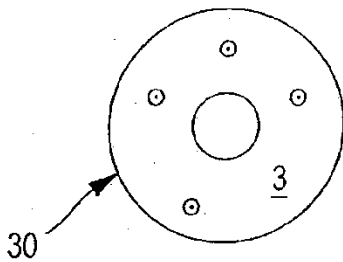


FIG. 5B

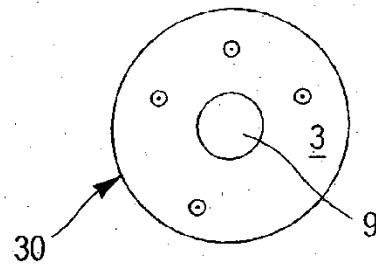


FIG. 6B

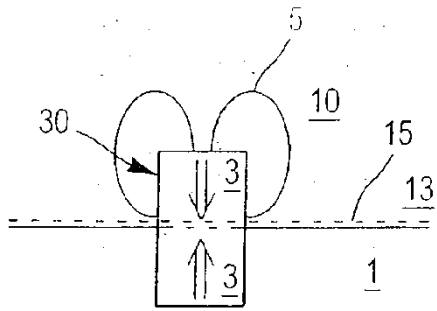


FIG. 7A

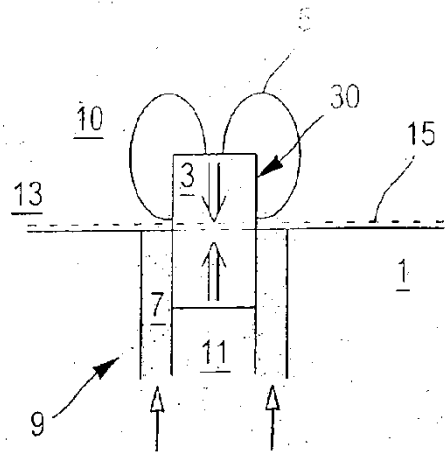


FIG. 8A



FIG. 7B

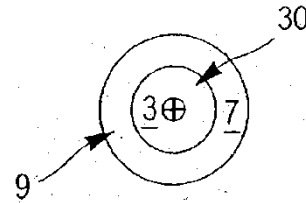


FIG. 8B

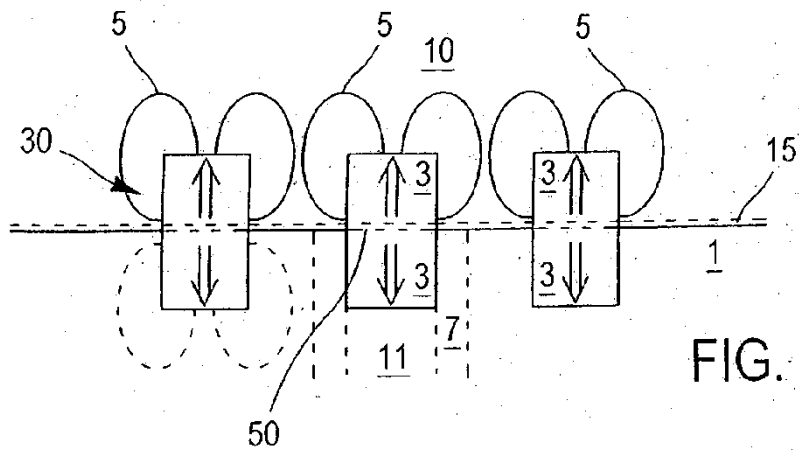


FIG. 9A

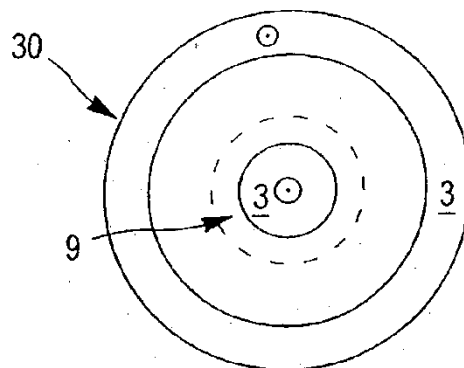


FIG. 9B

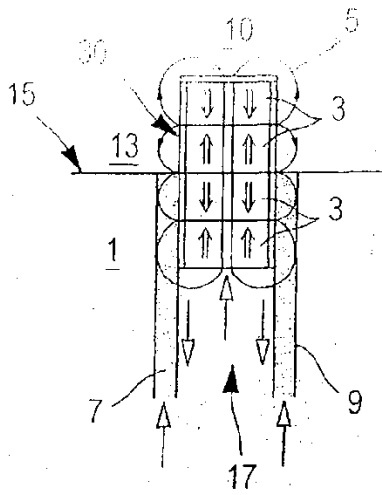


FIG. 10A

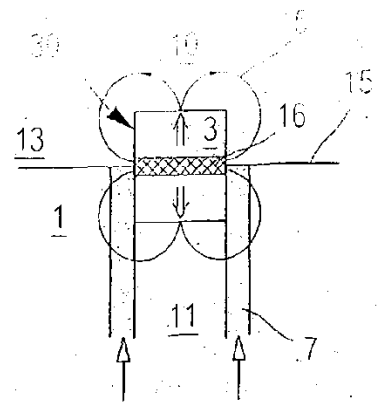


FIG. 11

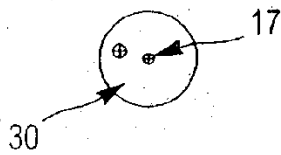


FIG. 10B

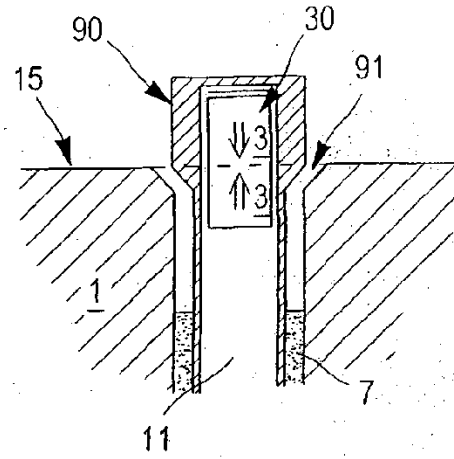


FIG. 12B

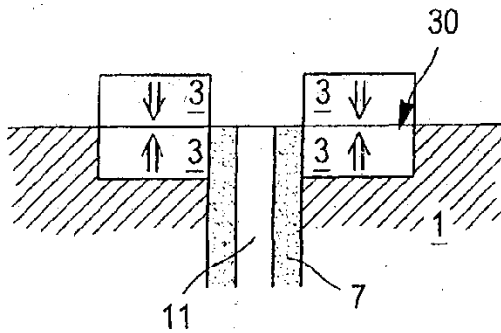


FIG. 12A

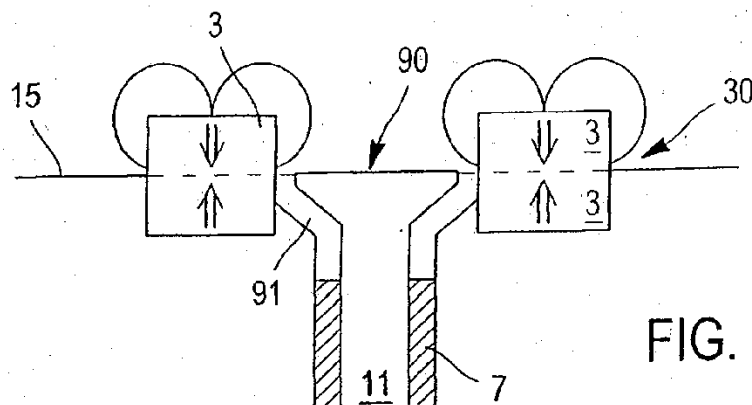


FIG. 12C

FIG. 13A

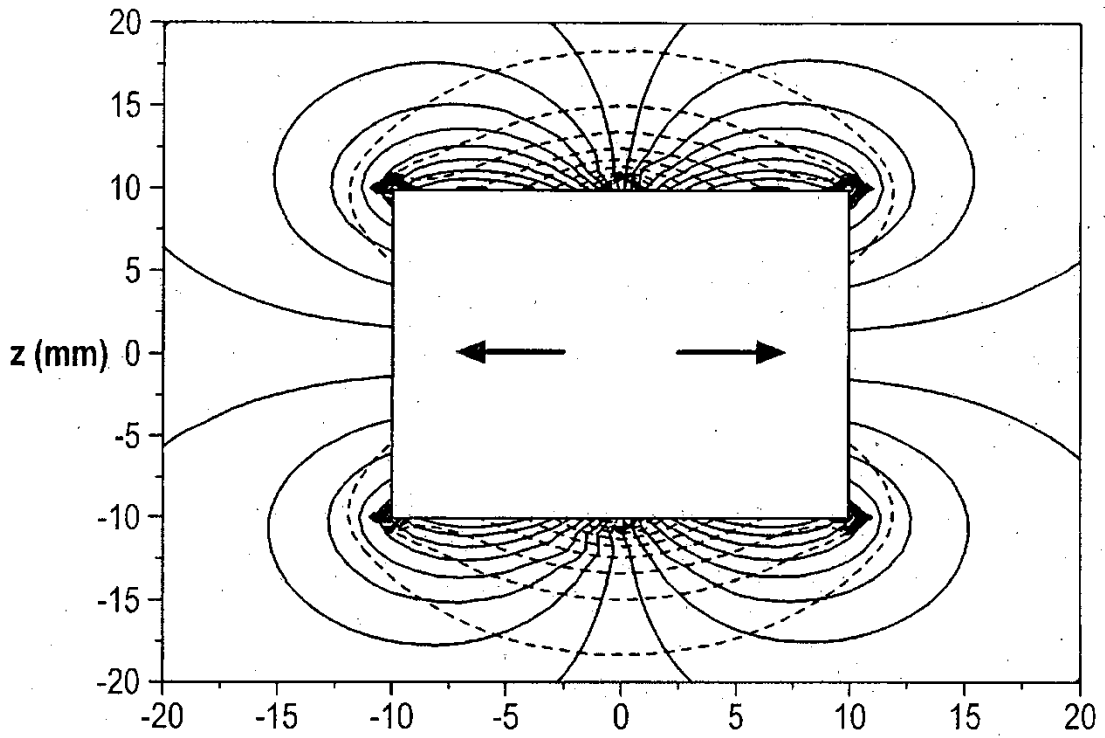


FIG. 13B

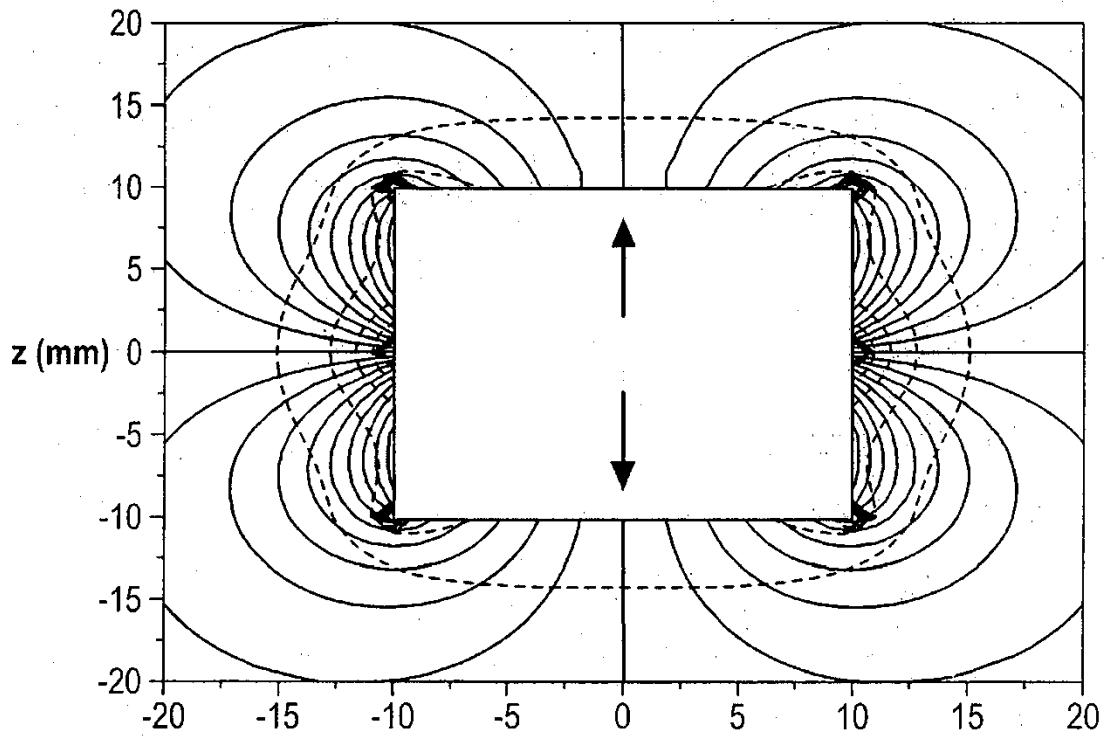


FIG. 14A

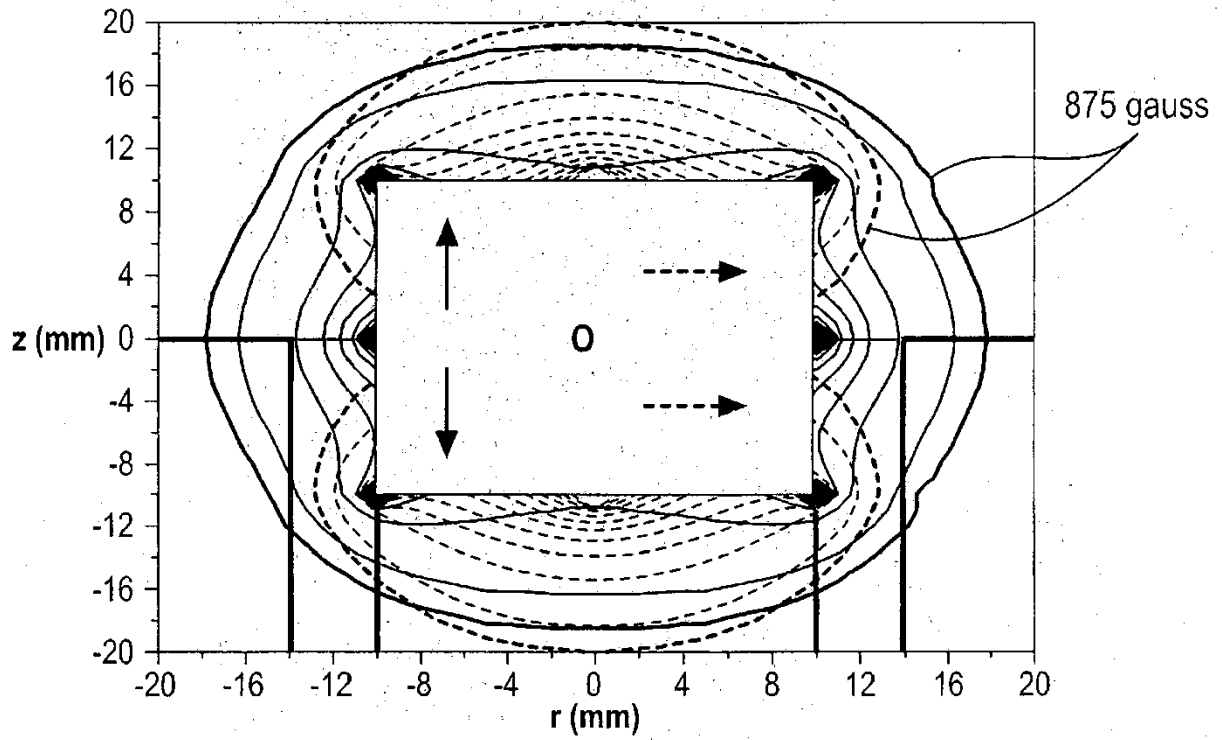


FIG. 14B

