

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 589 109**

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: **04.07.2007 PCT/EP2007/056760**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.01.2008 WO08009559**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2007 E 07765802 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.06.2016 EP 2044816**

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

30 Prioridad:

21.07.2006 FR 0606680

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

10.11.2016

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

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

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 589 109 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 procedimiento 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 engloba el volumen.

10

La invención se refiere asimismo 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 numerosos años de manera universal debido al incremento de las prestaciones que permite en términos de densidad y uniformidad del plasma.

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

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

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

35 El principio del confinamiento multipolar del plasma y, en particular, de los electrones que producen el plasma, parece desde entonces bien conocido. 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 son reenviadas a la región exenta de campo magnético desde donde habían sido emitidas (mecanismo que se denominará "mecanismo 1");
- 40 2) o bien franquean en su totalidad la región de campo magnético en las regiones donde su trayectoria es prácticamente paralela a las líneas de campo magnético, puesto que no hay entonces acoplamiento entre la partícula cargada y el campo magnético (mecanismo que se denominará "mecanismo 2"). Éste es el caso de las particular 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 la misma polaridad (caso de los imanes unitarios alternos);
- 45 3) o bien son capturadas en el campo magnético multipolar por un mecanismo colisional (mecanismo que se denominará "mecanismo 3).

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

- por una parte, las que son atrapadas en unas líneas de campo (mecanismo 3) que atraviesan unas superficies materiales, y
- 55 - por otra parte, 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 la misma polaridad (intensidad magnética mínima nula). Estas zonas de convergencia de las líneas de campo magnético se denominan "festones" (o "cusps" en inglés).

60

Los electrones enérgicos que producen el plasma (denominados electrones rápidos o primarios) son poco sensibles al campo magnético autoconsistente producido por la carga de espacio del plasma. Una vez atrapados en el campo magnético B_0 , como muestra la figura 1, en el intervalo entre dos colisiones elásticas o inelásticas, los electrones 6 oscilan entre dos puntos espejo M (donde la intensidad del campo magnético es idéntica). Los puntos espejo 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 de campo media 5. Sus trayectorias permanecen inscritas entre dos líneas de

65

campo magnético de intensidad constante.

5 Contrariamente a los electrones rápidos antes citados -poco sensibles al campo eléctrico del plasma como se ha dicho-, los iones y los electrones poco enérgicos del plasma (denominados electrones lentos o térmicos), que oscilan a su vez entre dos polos magnéticos opuestos, son sensibles al campo eléctrico del plasma y se difunden en el campo magnético de forma colectiva, bajo la influencia de este campo eléctrico.

10 Finalmente, fuera de estos movimientos de oscilación y difusión, las partículas cargadas se derivan a lo largo de los imanes o alrededor de éstos, perpendicularmente al plano que contiene el vector del campo magnético generado por la estructura magnética. Es por esta razón por la que es 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.

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

20 De hecho, el plasma puede ser producido también en el recinto o en su periferia por cualquier medio o método apropiados. De hecho, se puede contemplar cualquier tipo de excitación del plasma, cualquiera que sea la frecuencia de excitación y el modo de excitación (Resonancia Ciclotrónica Electrónica (o RCE), descarga continua, descarga continua pulsada, descarga de baja frecuencia BF, descarga de radiofrecuencia RF, onda de superficie, descarga inductiva, descarga magnetrón, etc.)

25 Es posible incluso utilizar las estructuras magnéticas de confinamiento para excitar el plasma, o bien por aplicación a la estructura de una tensión negativa continua o continua pulsada, una tensión BF o RF, o bien por la aplicación de microondas para una excitación de tipo resonancia electrónica ciclotrónica distribuida (RCED).

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

35 Unas fuentes de plasmas de microondas distribuidas según una red bidimensional permiten realizar unas fuentes planas (o alabeadas de grandes dimensiones), mientras que unas fuentes distribuidas según una red tridimensional permiten, a título de ejemplos no limitativos, producir unos volúmenes de plasma, por ejemplo en un reactor de geometría cilíndrica o esférica.

Ejemplos de dispositivos se divulgan en los documentos FR 2 797 372, FR 2 838 020 y FR 2 840 451.

40 Los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 020 divulgan unos dispositivos que permiten producir a baja presión (de 10^{-2} a unos pascales), unos plasmas planos o cilíndricos a partir de fuentes elementales mantenidas por microondas a la resonancia ciclotrónica electrónica (RCE). La producción del plasma por RCE requiere la presencia de un campo magnético que permita definir unas regiones donde 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 , o sea

$$45 \quad f_0 = eB_0/2\pi m_e \quad (1)$$

donde m_e es la masa del electrón.

50 En los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 020 el campo magnético es producido por un imán permanente (dipolo magnético) fijado al extremo de un aplicador de microondas coaxial. Por esta razón, estos tipos de plasma se denominan plasmas multidipolares. En particular, y como muestra la figura 1, el documento FR 2 838 020 enseña a disponer unos imanes permanentes 3 a distancia de las paredes 1, gracias a unos vástagos 4, para evitar que las trayectorias 6 de los electrones corten las paredes 1 y, por tanto, que éstos sean recogidos sobre estas superficies.

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

60 Por el contrario, la producción de plasma por RCE, tal como se describe en los documentos FR 2 797 372 y FR 2 838 200, adolece de inconvenientes principales en función de las condiciones operativas de las fuentes elementales, a saber:

- 65 1) el plasma 10 es producido preferentemente en la parte cilíndrica alrededor del imán 3 y no sobre la cara delantera del imán, como es preferible en numerosas aplicaciones;
- 2) el campo de presión de esta técnica está limitado a las bajas presiones, típicamente al pascal (10 mtorr), ya

que, a presiones superiores, el plasma se produce entonces esencialmente sobre la cara trasera del imán 3, y no en la cara delantera, lado de utilización. Por tanto, la técnica de producción de plasma permanece limitada al campo de las bajas presiones;

- 5 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 del plasma en el reactor.

10 Como muestra la figura 2, el documento FR 2 840 451 divulga a su vez una fuente de plasma 10 plana donde las microondas son aplicadas al plasma por unos aplicadores 9 de propagación coaxiales que terminan según una sección recta. Al estar estos aplicadores 9 distribuidos generalmente según una red cuadrada, estos tipos de plasma 10 se denominan plasmas matriciales. *A priori*, el campo de presión previsto (10 a 10^3 pascales) no requiere un 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 vuelven a cerrar necesariamente en bucle sobre unas paredes 1 metálicas o dieléctricas del recinto. En este caso, los electrones acelerados a la RCE son recogidos todos ellos sobre el aplicador coaxial 9, lo cual es catastrófico en el plano del balance de potencia del plasma. El confinamiento del plasma es ineficaz, sirviendo el imán 3 únicamente para proporcionar las condiciones de RCE indispensables para obtener la ruptura dieléctrica del plasma 10 a bajas presiones (del orden de un pascal a algunas decenas de pascales).

20 El documento US-A-6.022.446 divulga un dispositivo de confinamiento que comprende sobre una pared unos imanes de imantación radial, pero en el cual los imanes son concéntricos unos con respecto a otros. Esta estructura impone el uso de por lo menos dos coronas de imanes con una configuración magnética complicada, y está muy mal adaptada a un confinamiento que no presente simetría de revolución, y no se presta a la realización de redes bi o tridimensionales.

25 **Presentación de la invención**

La invención tiene por objetivo resolver por lo menos uno de los inconvenientes antes citados.

- 30 Con este fin, se propone según la invención un dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma según la reivindicación 1.

La invención se completa ventajosamente por las características de las reivindicaciones 2 a 10.

- 35 La invención se refiere asimismo a un procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma según las reivindicaciones 11 o 12.

La invención presenta numerosas ventajas.

- 40 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 cual el confinamiento magnético se vuelve ineficaz). Se puede operar así en un gran campo de presión, o bien con un acoplamiento RCE, o bien con un acoplamiento por absorción colisional cuando el campo magnético se vuelve inoperativo, es decir, cuando la frecuencia ν de colisiones elásticas de los electrones se vuelve grande frente 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 electrónica ciclotrónica ω_c ($\omega_0 = \omega_c$).

45 La invención propuesta puede encontrar aplicaciones muy numerosas, en particular en el campo de los tratamientos de superficie, como el grabado, los depósitos (PACVD o PAPVD), la implantación iónica por inmersión en plasma, por no citar más que algunos ejemplos.

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

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

65 Otra ventaja aportada por la invención es la posibilidad de realizar una estructura de confinamiento donde las líneas de campo magnético estén todas ellas situadas en el mismo semiespacio, de lo cual se deriva 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 jamás el plano mediano del imán y las zonas RCE rodean generalmente el imán, lo cual permite paliar 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 sobre la cara delantera de la estructura coaxial, de lo cual se deriva una producción del plasma hacia el volumen útil.

No hay ninguna disminución del volumen útil de plasma en el reactor, ya que el dispositivo comprende ventajosamente únicamente unos vástagos que soportan los imanes hacia el interior del recinto.

Otra ventaja aportada por la invención es la extensión de escala del confinamiento y de la producción de plasma. En efecto, no hay limitación teórica, ni incluso tecnológica, en 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 a tantos aplicadores como se deseen por tantos generadores independientes como sean necesarios, con o sin división de potencia. Cada aplicador puede ser alimentado con ayuda de un cable coaxial, puesto que la potencia de microondas necesaria para cada aplicador es relativamente pequeña, de lo cual se deriva la gran fiabilidad del dispositivo global.

Otra ventaja es la posibilidad de producir plasmas densos en toda la gama de presión definida 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 dominio fuera de RCE a presión más alta (acoplamiento por absorción colisional).

Otra ventaja es que, para imanes del comercio y condiciones de funcionamiento convencionales (por ejemplo, una frecuencia de microondas $f_0 = 2,45$ GHz), las líneas de intensidad de campo magnéticas B_0 rodean completamente el imán anular de tal modo que las microondas no puedan ser irradiadas fuera de la zona del aplicador sin atravesar una zona de acoplamiento RCE, de lo cual se deriva un acoplamiento óptimo de las microondas con un plasma de baja y 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). Así, la posibilidad de utilizar frecuencias mucho más bajas que 2,45 GHz permite contemplar, para cada fuente elemental, alimentaciones unitarias por transistores de potencia.

Presentación de las figuras

Otras características, objetivos y ventajas de la invención se desprenderán de la descripción que sigue, que es puramente ilustrativa y no limitativa, y que debe leerse con respecto a los dibujos adjuntos, en los que:

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

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

las figuras 4A y 4B representan de manera esquemática, respectivamente, una vista en sección y una vista frontal de un modo de realización posible de la invención;

las figuras 5A a 5C representan esquemáticamente unas secciones de modos de realización posibles de un aplicador según la invención; y

las figuras 6A a 6C representan esquemáticamente unos ejemplos de modos de realización posibles de un imán anular;

las figuras 7A y 7B representan de manera esquemática, respectivamente, una vista en sección y una vista frontal de un modo de realización posible de la invención que comprende un material de hierro dulce;

la figura 8 representa esquemáticamente una vista en sección de un modo de realización posible de la invención, en el que el hierro dulce de las figuras 7A y 7B es sustituido, sobre la periferia interna y/o externa, por unos anillos imanes de polarización opuesta con el fin de conservar preferentemente una simetría con respecto al plano medio del imán; y

la figura 9 muestra un modo de realización en el que el imán anular está situado sobre el alma central del aplicador coaxial en lugar de estar situado en la periferia del aplicador coaxial.

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

Descripción detallada

- 5 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 actuar de manera que las trayectorias de las partículas cargadas procedentes del plasma y atrapadas alrededor de una línea de campo magnético no encuentren paredes (pérdidas por el mecanismo 3).
- 10 Para ello, es necesario que las trayectorias de los electrones atrapados estén libres de cualquier obstáculo entre dos puntos espejo M de igual intensidad de campo magnético.
- 15 Se propone así según la invención un dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma 10, visible más particularmente en las figuras 4A y 4B.
- El dispositivo comprende principalmente un recinto 13 en cuyo volumen se produce o se confina el plasma 10.
- 20 El recinto 13 comprende una pared 1 que define una envuelta 15 interior al recinto y que engloba el volumen.
- En la continuación de la presente descripción, se denomina "recinto" al recipiente en cuyo volumen se produce o se confina el plasma 10, pudiendo dividirse así un mismo dispositivo en varios recintos, por ejemplo mediante unos tabiques internos o paredes suplementarias que separan el dispositivo.
- 25 El dispositivo comprende por lo menos un imán anular 30 centrado sobre una normal 14 a la envuelta.
- El imán anular 30 es de dirección de imantación radial. Además, está dispuesto en la proximidad de la pared 1 que define la envuelta 15 que soporta la normal 14, de modo que la dirección de imantación sea sustancialmente perpendicular a dicha normal 14 en la envuelta 15.
- 30 Dicha configuración del imán anular permite realizar un confinamiento del plasma sin que las trayectorias 6 de los electrones atrapados encuentren una pared 1 del recinto.
- De una forma general, el imán anular comprende principalmente una imantación radial, pero también una simetría con respecto a un plano paralelo a la dirección de imantación radial, al que se le podrá denominar plano medio del imán.
- 35 Para realizar una producción de plasma 10, el dispositivo comprende además por lo menos una fuente elemental de plasma que incluye un aplicador coaxial 9 de microondas.
- 40 El aplicador 9 atraviesa la pared 1 del recinto y comprende un alma central 11.
- El imán anular 30 está centrado sobre el alma central 11 del aplicador 9. El imán anular 30 de imantación radial está colocado alrededor de un extremo libre 90 del aplicador coaxial de conducción de microondas.
- 45 En el caso del confinamiento y/o de la producción, sólo las líneas de campo magnético 5 en la parte delantera de un plano longitudinal medio 50 del imán 30 están situadas en el lado del plasma 10, como muestran las figuras 4A y 4B.
- En efecto, el dispositivo de las figuras 4A y 4B permite en particular resolver las dificultades de la técnica anterior. En efecto, el plasma está confinado de manera eficaz. Puede producirse frente al aplicador 9. Además, el campo magnético B0 no perturba el acoplamiento por absorción colisional, que toma el relevo de la RCE cuando aumenta la presión. En efecto, la configuración de las líneas 5 de campo del imán permanente 30 hace que estas últimas vayan de un polo al polo opuesto sin atravesar jamás el plano medio 50 del imán 30.
- 50 El aplicador coaxial 9 comprende un material dieléctrico 7 dispuesto alrededor del alma central 11, a nivel de la pared 1 del recinto. Por supuesto, el material dieléctrico 7 puede estar dispuesto por debajo del nivel de la pared, como se indica en la figura 5C, o por encima de la pared 1. El material 7 está así dispuesto sobre una parte por lo menos de la longitud del aplicador 9.
- 60 Un dispositivo según la invención, para realizar un dispositivo de confinamiento de un plasma 10 de grandes dimensiones, comprende, según unas redes bi o tridimensionales, una pluralidad de imanes 30 anulares de imantación radial dispuestos en la periferia del plasma 10.
- 65 Los imanes no son concéntricos entre ellos, de modo que las líneas de campo magnético se vuelven a cerrar en bucle sobre el polo opuesto del mismo imán. Así, las líneas de campo, que no atraviesan el plano medio del imán, no atraviesan ninguna pared del recinto. En otros términos, los imanes son externos unos a otros para formar las

redes antes citadas.

Este dispositivo puede comprender asimismo una pluralidad de fuentes elementales que comprenden cada una de ellas un aplicador 9.

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

10 Así, para fuentes elementales distribuidas según unas redes bi o tridimensionales, el dispositivo presenta una estructura magnética:

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

25 Los imanes 30 distribuidos según unas redes bi o tridimensionales pueden presentar todos el mismo sentido de imantación radial con respecto a las paredes 1 o a los aplicadores 9 que éstas rodean, o bien unos sentidos alternos. Dicho de otra manera, la imantación radial puede ser centrípeta (véase, por ejemplo, la figura 6B) para la totalidad o parte de los imanes 30 y/o centrífuga (véase, por ejemplo, la figura 6A) para la totalidad o parte de los imanes 30.

Asimismo, solamente una parte de los imanes 30 anulares (un imán 30 de dos o una hilera de dos imanes 30, a título de ejemplos no limitativos) pueden ser alimentados con microondas por un aplicador 9.

30 Como muestra la figura 4A, el imán anular 30 está por lo menos parcialmente en contacto con la pared 1 del recinto. El imán 30 puede encastrarse así en la pared 1 del recinto hasta un plano medio 50 del imán 30. El extremo libre 90 del alma central 11 está enrasado con el nivel de la pared del recinto.

35 La invención puede presentar numerosas variantes con respecto a la configuración propuesta en las figuras 4A y 4B. Estas variantes se refieren particularmente a la posición del imán 30 con respecto al aplicador coaxial 9 y/o a la forma del extremo libre 90 del aplicador.

40 La figura 5A muestra que el imán 30 puede estar totalmente encastrado en la pared 1 del recinto. En este caso, las superficies de la pared 1, del imán 30, del material dieléctrico 7 y del alma central 11 están al mismo nivel.

La figura 5B muestra que el alma central 11 puede sobrepasar el nivel de la pared 1. En este caso asimismo, el material 7 dieléctrico puede rodear el alma central 11 y recubrir el extremo libre 90 del aplicador 9.

45 La figura 5C muestra que el extremo libre 90 del aplicador puede tener una sección recta más importante que la sección recta del alma central 11. En este caso, el diámetro interno del imán 30 es superior al diámetro exterior del extremo libre 90.

50 Los imanes 30 pueden estar también únicamente en contacto con la pared 1 o estar un poco por encima del nivel de la pared 1, sobre unos soportes.

55 Estas variantes, presentadas a título 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 ciertas condiciones de funcionamiento, el acoplamiento del plasma en la estructura coaxial, es frecuentemente preferible, como se ha visto, utilizar un aplicador lleno total o parcialmente de material dieléctrico 7.

60 Los imanes 30 de imantación radial pueden presentar también unas formas variadas. Como muestran las figuras 4A y 6C, el imán anular 30 puede ser circular. Las figuras 6A y 6B muestran que el imán 30 puede ser asimismo poligonal, como cuadrado (figura 6A), hexagonal (figura 6B), octogonal, decagonal,... No obstante, la forma anular circular es de lejos la más común y la más simple de utilizar.

Las figuras 7A y 7B muestran que el imán 30 presenta una periferia interna 31 y una periferia externa 32.

65 Ventajosamente, el imán 30 está rodeado en su periferia interna 31 y/o externa 32 por un material de fuerte permeabilidad magnética, por ejemplo en forma de anillos 12 y/o 16. Los anillos 12 y/o 16 son, por ejemplo, unos anillos de hierro dulce. El material de fuerte permeabilidad magnética permite ajustar la configuración de las líneas 5

de campo a nivel de los polos magnéticos del imán 30.

5 Como muestra la figura 8, ventajosamente, el imán 30 está rodeado en su periferia interna 31 y/o externa 32 por unos anillos imanes 120 y/o 160. Los anillos imanes 120 y/o 160 tienen unas direcciones de imantación axiales y no radiales que permiten poner los polos y, por tanto, las líneas de campo, por encima y por debajo de los planos superior e inferior del imán anular 30.

10 Además, la figura 9 muestra que, en el caso en que el alma central 11 del aplicador coaxial sea muy ancha, el imán anular 30 (otro ejemplo) puede estar situado sobre dicha alma en lugar de estar situado en el exterior de la estructura coaxial.

15 Por supuesto, 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 por una circulación 17 de un fluido caloportador gaseoso o líquido.

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

20 La frecuencia de microondas utilizada no es crítica y, por lo tanto, es posible utilizar una de las frecuencias ISM como la de 915 MHz o la de 2,45 GHz, incluso 5,8 GHz. Para una excitación del plasma a la resonancia ciclotrónica por microondas a 2,45 GHz, la condición de resonancia ($B_0=0,0875$ tesla) se cumple fácilmente mediante unos imanes permanentes convencionales, como de samario-cobalto, incluso de ferrita de bario o de ferrita de estroncio. Éste es aún más el caso a 100, 200 o 300 MHz, donde el coste de los transistores de potencia es mucho más pequeño que a 915 MHz o 2,45 GHz. Por supuesto, las frecuencias dadas a título de ejemplo no son limitativas.

25

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de producción y/o de confinamiento de un plasma (10), que comprende:

- 5 - un recinto (13) en cuyo volumen se produce o se confina el plasma, comprendiendo dicho recinto una pared (1) que define una envuelta (15) interior al recinto y que engloba el volumen,
- una pluralidad de imanes anulares (30), centrados sobre una normal (14) a la envuelta, de dirección de imantación radial y dispuestos en la proximidad de la pared (1) que define la envuelta que soporta la normal, de modo que la dirección de imantación sea sustancialmente perpendicular a dicha normal a la envuelta;

caracterizado por que dichos imanes anulares (30) están dispuestos de manera no concéntrica a nivel de la pared para formar una red bidimensional o tridimensional.

15 2. Dispositivo según la reivindicación 1, en el que la red es cuadrada o hexagonal.

3. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 o 2, que 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, estando además un imán anular (30) centrado sobre el alma central (11) del aplicador.

4. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que cada imán anular (30) está por lo menos parcialmente en contacto con la pared del recinto.

25 5. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el aplicador coaxial comprende un material dieléctrico (7) dispuesto alrededor del alma central (11), por los menos sobre una parte de la longitud del aplicador.

6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 5, en el que cada imán anular (30) es circular o poligonal.

30 7. Dispositivo según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que cada imán anular (30) presenta una periferia interna (31) y una periferia externa (32), estando el imán rodeado en su periferia interna y/o externa por un material de fuerte permeabilidad magnética.

35 8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 7, en el que cada imán suministra un campo magnético de intensidad B_0 tal que la frecuencia f_0 de un campo magnético de las microondas aplicadas por un aplicador sea igual a una frecuencia f de rotación de electrones en el campo magnético, o sea:

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

40 donde m_e es la masa de un electrón,

para permitir la producción del plasma a baja presión, por resonancia ciclotrónica electrónica.

45 9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 8, en el que el imán anular (30) está dispuesto en el exterior del aplicador coaxial.

10. Dispositivo según una de las reivindicaciones 3 a 8, en el que el imán anular (30) está dispuesto sobre el alma central del aplicador coaxial.

50 11. Procedimiento de producción y/o de confinamiento de un plasma (10) en un recinto, comprendiendo dicho recinto una pared (1) que define una envuelta interior al recinto y que engloba un volumen, que comprende una etapa que consiste en

55 disponer una pluralidad de imanes anulares (30), centrados sobre una normal a dicha envuelta, de dirección de imantación radial en la proximidad de la pared (1) que define la envuelta que soporta la normal, de modo que la dirección de imantación sea sustancialmente perpendicular a dicha normal a la envuelta;

caracterizado por que comprende una etapa que consiste en

60 disponer dichos imanes anulares (30) de manera no concéntrica a nivel de la pared para formar una red bidimensional o tridimensional.

65 12. Procedimiento según la reivindicación 11, que incluye además por lo menos una etapa que consiste en producir el plasma gracias a 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, estando además un imán anular (30) centrado sobre el alma central (11) del aplicador.

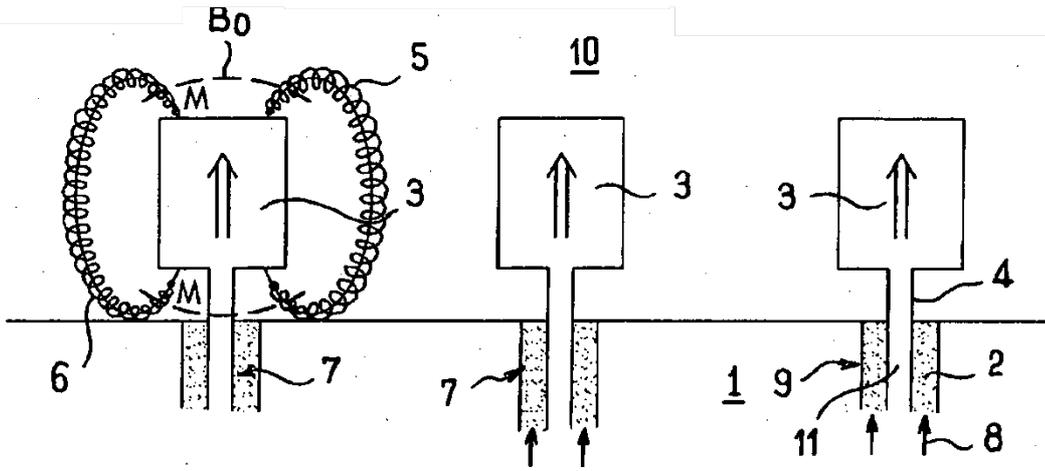


FIG.1

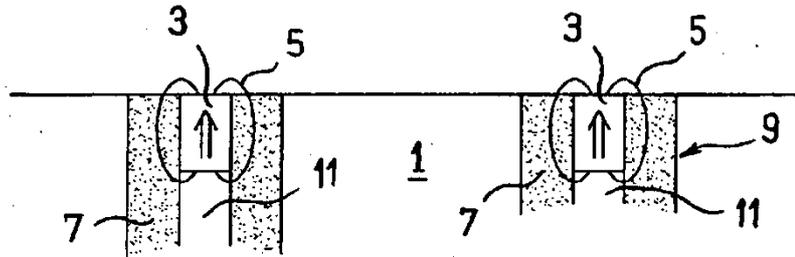


FIG.2

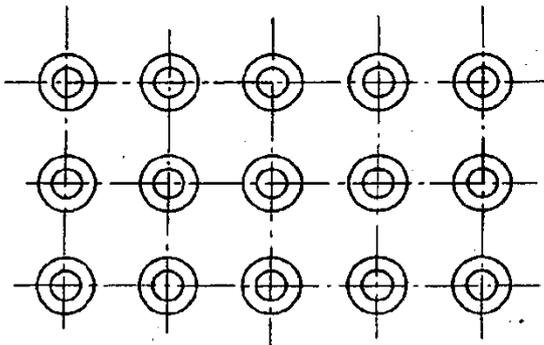


FIG.3A

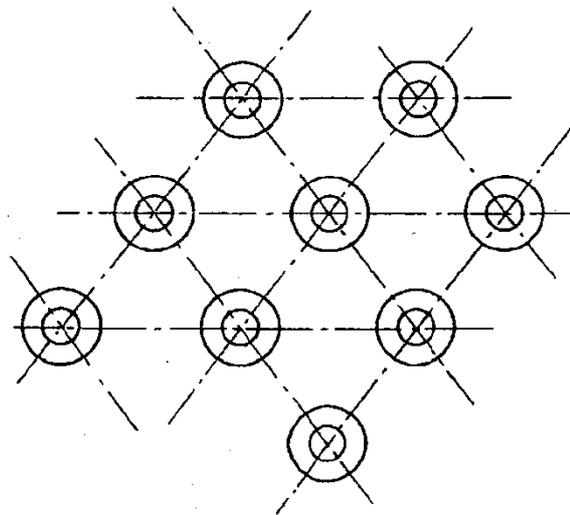


FIG.3B

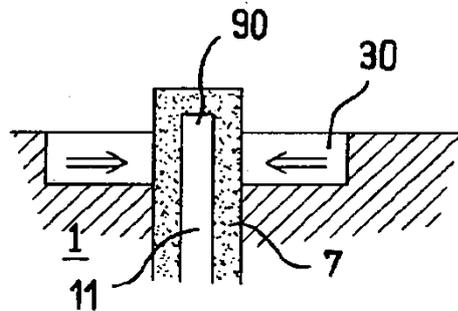
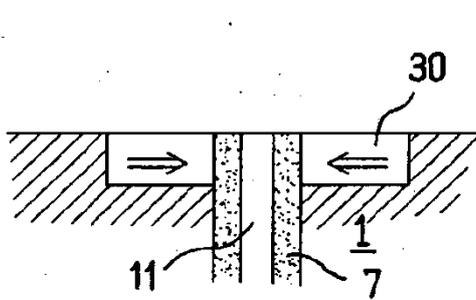
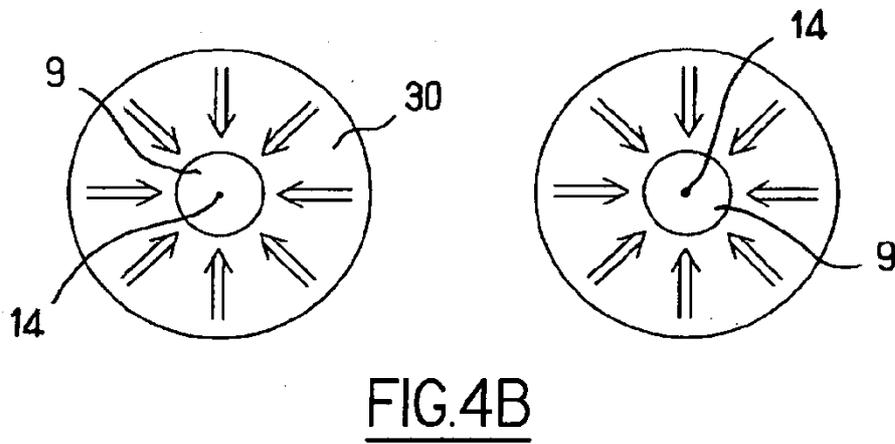
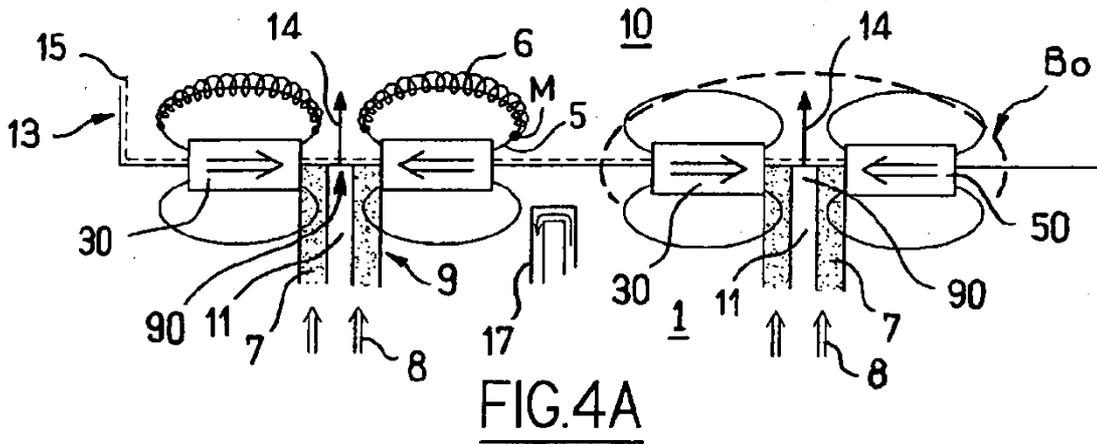


FIG. 5A

FIG. 5B

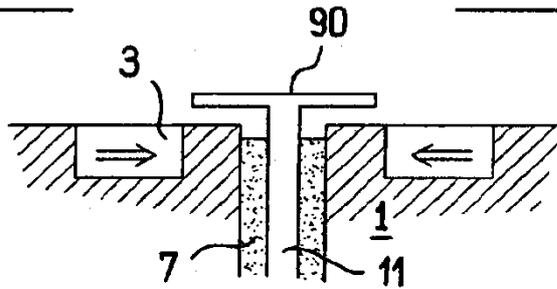


FIG. 5C

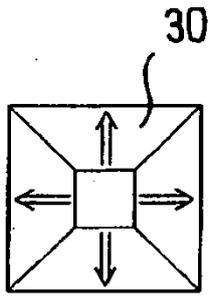


FIG. 6A

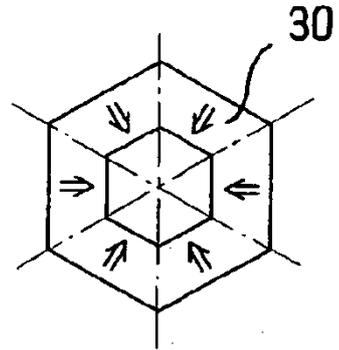


FIG. 6B

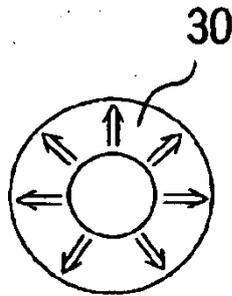


FIG. 6C

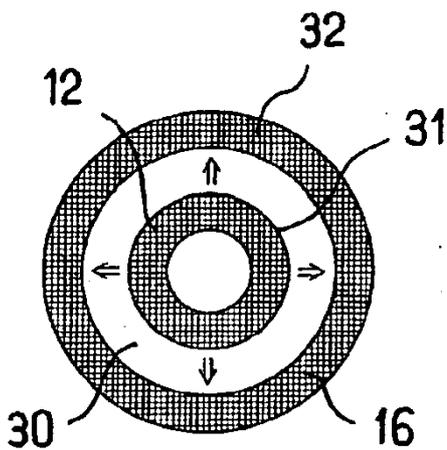


FIG. 7B

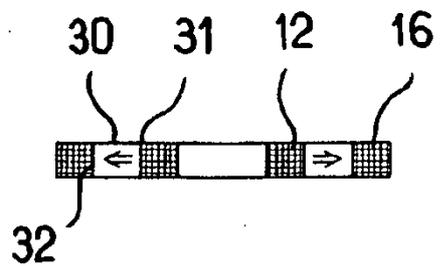


FIG. 7A

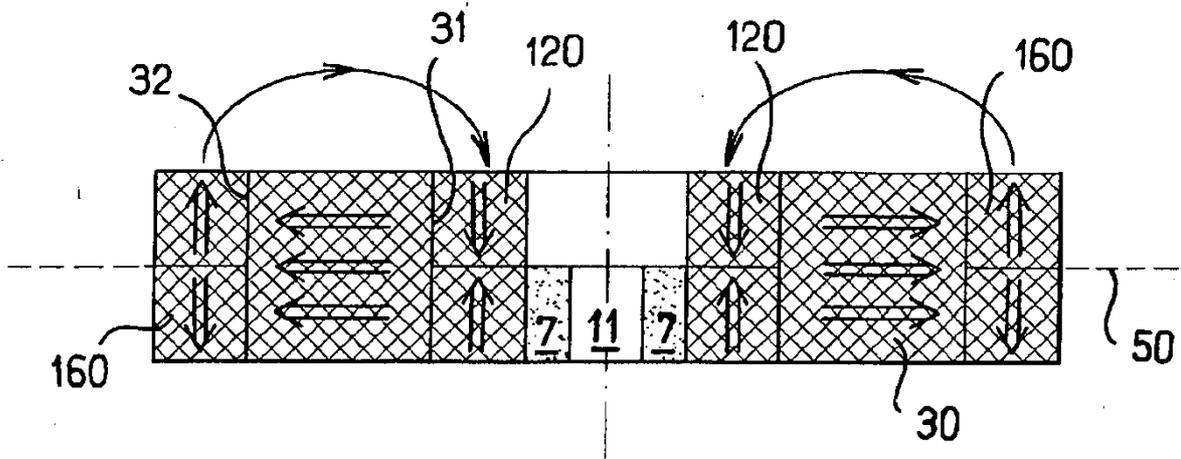


FIG. 8

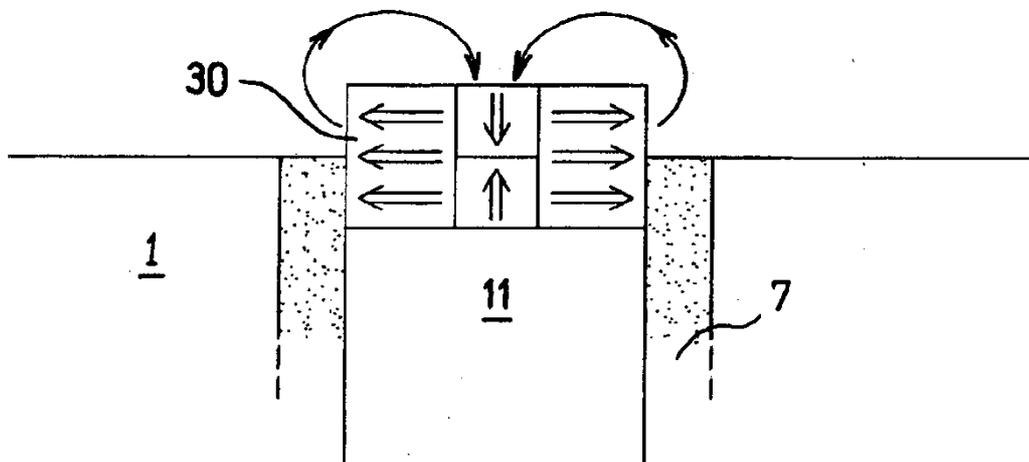


FIG. 9