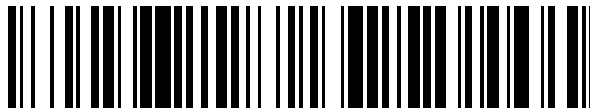


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 768 714**

51 Int. Cl.:

H05H 1/46

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.03.2015 PCT/US2015/021382**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.10.2015 WO15148246**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.03.2015 E 15715899 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2019 EP 3123840**

54 Título: **Aplicador de plasma de microondas con uniformidad de potencia mejorada**

30 Prioridad:

27.03.2014 US 201414226994
12.03.2015 US 201514645837

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.06.2020

73 Titular/es:

MKS INSTRUMENTS, INC. (100.0%)
2 Tech Drive, Suite 201
Andover, MA 01810 , US

72 Inventor/es:

CHEN, XING;
JI, CHENGXIANG;
MADDEN, ERIN;
POKIDOV, ILYA y
WENZEL, KEVIN, W.

74 Agente/Representante:

SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio

ES 2 768 714 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

Aplicador de plasma de microondas con uniformidad de potencia mejorada

5 Antecedentes

1. Campo técnico

10 Esta descripción se refiere a sistemas de plasma de microondas y, más particularmente, a un aplicador de plasma de microondas refrigerado por fluido para producir especies gaseosas reactivas para aplicaciones de procesamiento.

2. Discusión de la técnica relacionada

15 Los gases reactivos y las mezclas de gases se usan en muchas operaciones industriales, que incluyen el procesamiento de materiales tales como las obleas de semiconductores para la fabricación de dispositivos electrónicos y ópticos. Los gases reactivos pueden usarse, por ejemplo, en la deposición y grabado de película delgada en la fabricación de microelectrónica para grabar materiales dieléctricos y semiconductores o varias películas de enmascaramiento tales como fotorresistente y poliimida. Los gases reactivos pueden usarse para formar películas dieléctricas y películas metálicas, y también pueden usarse para limpiar superficies de obleas en varias etapas del procesamiento de obleas.

20 Las especies reactivas de moléculas de gas pueden producirse al excitar las moléculas de gas en una descarga de plasma. La descarga puede crearse con una fuente de plasma mediante el acoplamiento de energía en un tubo de descarga de plasma o una ventana dieléctrica en una cámara que contiene el gas. La energía de microondas a menudo se usa como la fuente de energía para crear y sostener una descarga de plasma. Una frecuencia de microondas típica usada para crear descargas de plasma es 2,45 GHz, debido a la disponibilidad de fuentes de alimentación y componentes del sistema.

25 Es deseable tener una fuente de plasma que sea capaz de producir una gran cantidad de diversas especies gaseosas reactivas bajo condiciones muy limpias. Los ejemplos de especies deseables incluyen los diversos halógenos atómicos (flúor atómico, cloro, bromo, etc.), oxígeno atómico, nitrógeno atómico e hidrógeno atómico. Una dificultad técnica en el uso de energía de microondas para crear una gran cantidad de especies gaseosas reactivas en una fuente de plasma es enfriar el tubo de descarga de plasma o la ventana dieléctrica. El enfriamiento por aire puede usarse para el tubo de descarga de plasma, pero es relativamente ineficiente en comparación con el enfriamiento por líquido. Además, el enfriamiento por aire requiere sopladores de aire o compresores relativamente grandes y costosos para eliminar una cantidad suficiente de calor. Además, el enfriamiento por aire puede no ser compatible con los entornos modernos de sala limpia usados para la fabricación de semiconductores.

30 El enfriamiento por líquido es ventajoso porque es eficiente. El enfriamiento por agua es particularmente deseable porque el agua tiene una alta capacidad térmica, y es segura de manejar y benigna para el medio ambiente. Además, el agua fría está disponible fácilmente en casi todas las instalaciones de fabricación, universidades, y de investigación y desarrollo. Una barrera para usar agua para enfriar los tubos de descarga de plasma de microondas es que el agua también absorbe fácilmente la energía de microondas. De manera similar, muchos otros líquidos refrigerantes deseables absorben fácilmente la energía de microondas.

35 Ciertos fluidos tales como los aceites de silicona, algunos clorofluorocarbonos y varios compuestos de hidrocarburos no absorben la energía de microondas y, por lo tanto, pueden usarse para enfriar el exterior de un tubo de descarga de plasma. Desafortunadamente, estos fluidos son a menudo indeseables para el medio ambiente, peligrosos de manejar y costosos. Además, el uso de estos fluidos requiere el uso de intercambiadores de calor de circuito cerrado, lo que aumenta aún más el costo y la complejidad del sistema.

40 Se han usado varias técnicas para generar plasmas y producir gases activados. Estas incluyen descargas acopladas capacitivamente, descargas acopladas inductivamente y descargas de microondas. Ninguno de los dispositivos anteriores ha sido adecuado para producir gases de alto flujo, libres de contaminación, activados químicamente, útiles para aplicaciones industriales.

45 Ejemplos de dispositivos para la producción de plasma de microondas pueden encontrarse en los documentos WO 03/026365 A1, JP-H 107778 A, WO 00/61384, US 5 625 259, US 4 207 452, US 4 908 492 y US 2008/0011231 A1.

60 Resumen

La presente invención define un aparato para generar plasma de acuerdo con la reivindicación 1.

Las modalidades preferidas de la presente invención se definen en las reivindicaciones dependientes.

65

Más generalmente, de acuerdo con un aspecto de la presente descripción, se proporciona un aparato para generar plasma. El aparato incluye un tubo de descarga de plasma que es sustancialmente transparente a la energía de microondas y que tiene un eje longitudinal. Una bobina conductora que comprende un material eléctricamente conductor se enrolla sustancialmente de manera helicoidal alrededor de una superficie externa del tubo de descarga de plasma. Una cavidad de microondas rodea el tubo de descarga de plasma. Una guía de ondas se acopla a la cavidad de microondas para guiar la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma de manera que el plasma se genera en el tubo de descarga de plasma. La guía de ondas tiene un eje principal de sección transversal y un eje secundario de sección transversal, los ejes de sección transversal principal y secundario que se posicionan con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma de manera que un campo eléctrico de la energía de microondas se orienta en un ángulo predeterminado con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. El campo eléctrico de la energía de microondas induce una corriente eléctrica en la bobina conductora, la corriente eléctrica que afecta la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma, el ángulo predeterminado que puede seleccionarse de manera que la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma sea de acuerdo con un perfil predeterminado con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo predeterminado es tal que el campo eléctrico se orienta sustancialmente perpendicular al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo predeterminado es tal que el campo eléctrico se orienta en un ángulo de 30° a 90° con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo predeterminado es tal que el campo eléctrico se orienta en un ángulo de 45° a 90° con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo predeterminado se selecciona para aumentar la uniformidad de la absorción de energía con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora comprende una pluralidad de bucles alrededor del tubo de descarga de plasma, la pluralidad de bucles que define un patrón de separación entre los bucles adyacentes, el patrón de separación que puede seleccionarse en base a un efecto deseado predeterminado de la corriente inducida en la bobina conductora sobre la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el patrón de separación entre los bucles adyacentes se selecciona para aumentar la uniformidad de la absorción de energía con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, la separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede disminuir para aumentar la corriente eléctrica inducida en la bobina conductora de manera que aumente la propagación de la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados. En algunas modalidades ilustrativas, la separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede aumentar para disminuir la corriente eléctrica inducida en la bobina conductora de manera que disminuya la propagación de la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora se acopla térmicamente al tubo de descarga de plasma, y la bobina conductora comprende un canal a través del cual puede fluir un fluido refrigerante, de manera que el fluido refrigerante elimina el calor del tubo de descarga de plasma. La separación entre los bucles adyacentes puede seleccionarse para controlar la temperatura del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, el aparato comprende además un estrangulador de microondas en cada uno de los dos extremos de la bobina conductora, los estranguladores de microondas que evitan sustancialmente la fuga de la energía de microondas desde el tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora se enrolla helicoidalmente alrededor de la superficie externa del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, un controlador controla el ángulo predeterminado entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. El aparato puede incluir al menos uno de un sensor de campo electromagnético para generar una primera señal indicativa de la intensidad del campo electromagnético en el tubo de descarga de plasma y un sensor de temperatura para generar una segunda señal indicativa de la temperatura en el tubo de descarga de plasma, y el controlador controla el ángulo predeterminado basado en al menos una de las primera y segunda señales. El aparato puede incluir al menos un actuador para girar la guía de ondas con respecto al tubo de descarga de plasma para ajustar el ángulo predeterminado, el controlador que controla el al menos un actuador para controlar el ángulo predeterminado.

De acuerdo con otro aspecto de la presente descripción, se proporciona un aparato para generar plasma. El aparato incluye un tubo de descarga de plasma que es sustancialmente transparente a la energía de microondas y que tiene un eje longitudinal. Una bobina conductora que comprende un material eléctricamente conductor se enrolla sustancialmente de manera helicoidal alrededor de una superficie externa del tubo de descarga de plasma. Un campo eléctrico de la energía de microondas induce una corriente eléctrica en la bobina conductora, y la corriente eléctrica afecta la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma. Una cavidad de microondas rodea el tubo de descarga de plasma. Una guía de ondas se acopla a la cavidad de microondas para guiar la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma de manera que el plasma se genera en el tubo de descarga de plasma. Un dispositivo de acoplamiento giratorio acopla la guía de ondas al tubo de descarga de plasma y permite que la guía de ondas gire

con respecto al tubo de descarga de plasma para ajustar un ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma, de manera que la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma puede ajustarse a través del dispositivo de acoplamiento giratorio a un perfil predeterminado con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, la guía de ondas comprende un eje principal de sección transversal y un eje secundario de sección transversal, el dispositivo de acoplamiento giratorio que permite que los ejes de sección transversal principal y secundario se ajusten con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma para ajustar el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, el aparato comprende además un controlador para ajustar el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. El aparato puede incluir al menos uno de un sensor de campo electromagnético para generar una primera señal indicativa de la intensidad del campo electromagnético en el tubo de descarga de plasma y un sensor de temperatura para generar una segunda señal indicativa de la temperatura en el tubo de descarga de plasma, y el controlador controla el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma basado en al menos una de las primera y segunda señales. El aparato puede incluir al menos un actuador para girar la guía de ondas con respecto al tubo de descarga de plasma para ajustar el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma, el controlador que controla el al menos un actuador para controlar el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma puede ajustarse de 30° a 90°. En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma puede ajustarse de 45° a 90°. En algunas modalidades ilustrativas, el ángulo entre el campo eléctrico de la energía de microondas y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma se ajusta para aumentar la uniformidad de la absorción de energía con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, el aparato comprende además un sensor para monitorear la uniformidad axial del plasma en el tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora comprende una pluralidad de bucles alrededor del tubo de descarga de plasma, la pluralidad de bucles que define un patrón de separación entre los bucles adyacentes, el patrón de separación que puede seleccionarse en base a un efecto deseado predeterminado de la corriente inducida en la bobina conductora sobre la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el patrón de separación entre los bucles adyacentes se selecciona para aumentar la uniformidad de la absorción de energía con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, la separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede disminuir para aumentar la corriente eléctrica inducida en la bobina conductora de manera que aumente la propagación de la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados. En algunas modalidades ilustrativas, la separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede aumentar para disminuir la corriente eléctrica inducida en la bobina conductora de manera que disminuya la propagación de la energía de microondas en el tubo de descarga de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora se acopla térmicamente al tubo de descarga de plasma, y la bobina conductora comprende un canal a través del cual puede fluir un fluido refrigerante, de manera que el fluido refrigerante elimina el calor del tubo de descarga de plasma. La separación entre los bucles adyacentes puede seleccionarse para minimizar la temperatura del tubo de descarga de plasma mientras se garantiza la propagación de los campos de microondas.

En algunas modalidades ilustrativas, el aparato comprende además un estrangulador de microondas en cada uno de los dos extremos de la bobina conductora, los estranguladores de microondas que evitan sustancialmente la fuga de la energía de microondas desde el tubo de descarga de plasma.

En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora se enrolla helicoidalmente alrededor de la superficie externa del tubo de descarga de plasma.

De acuerdo con otro aspecto de la presente descripción, se proporciona un conjunto de tubo de descarga de plasma para un dispositivo generador de plasma. El conjunto incluye un tubo de descarga de plasma que es sustancialmente transparente a la energía de microondas y que tiene un eje longitudinal. Una bobina conductora que comprende un material eléctricamente conductor se enrolla sustancialmente de manera helicoidal alrededor de una superficie externa del tubo de descarga de plasma. Un campo eléctrico de la energía de microondas induce una corriente eléctrica en la bobina conductora, la corriente eléctrica que afecta la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma. Una pluralidad de estranguladores de microondas se disponen en cada uno de los dos extremos de la bobina conductora,

los estranguladores de microondas que evitan sustancialmente la fuga de la energía de microondas desde el tubo de descarga de plasma.

5 En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora comprende una pluralidad de bucles alrededor del tubo de
 descarga de plasma, la pluralidad de bucles que define un patrón de separación entre los bucles adyacentes, el patrón
 de separación que puede seleccionarse en base a un efecto deseado predeterminado de la corriente inducida en la
 bobina conductora sobre la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades
 10 ilustrativas, el patrón de separación entre los bucles adyacentes se selecciona para aumentar la uniformidad de la
 absorción de energía con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. En algunas modalidades
 ilustrativas, la separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede disminuir para aumentar la corriente
 eléctrica inducida en la bobina conductora de manera que aumente la propagación de la energía de microondas en el
 tubo de descarga de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados. En algunas modalidades ilustrativas, la
 15 separación entre los bucles adyacentes seleccionados puede aumentar para disminuir la corriente eléctrica inducida
 en la bobina conductora de manera que disminuya la propagación de la energía de microondas en el tubo de descarga
 de plasma cerca de los bucles adyacentes seleccionados. En algunas modalidades ilustrativas, la separación entre
 los bucles adyacentes está entre 0,2 y 1 cm.

20 En algunas modalidades ilustrativas, la bobina conductora se acopla térmicamente al tubo de descarga de plasma, y
 la bobina conductora comprende un canal a través del cual puede fluir un fluido refrigerante, de manera que el fluido
 refrigerante elimina el calor del tubo de descarga de plasma.

Breve descripción de los dibujos

25 Las características y ventajas anteriores y otras serán evidentes a partir de la descripción más particular de las
 modalidades preferidas, como se ilustra en los dibujos adjuntos, en los que los caracteres de referencia similares se
 refieren a las mismas partes en las diferentes vistas. Los dibujos no están necesariamente a escala, sino que se pone
 énfasis en ilustrar los principios del concepto inventivo

30 La Figura 1 incluye una vista esquemática en sección transversal de un aplicador de plasma de microondas refrigerado
 por líquido.

La Figura 2 incluye una vista esquemática en sección transversal de un aplicador de plasma de microondas refrigerado
 por líquido, que puede usar fluidos que absorben microondas.

35 La Figura 3 incluye un diagrama esquemático en sección transversal de una modalidad de la camisa de enfriamiento
 ilustrada en la Figura 2.

Las Figuras 4A y 4B incluyen perfiles esquemáticos de absorción de energía para el aplicador de plasma 2 ilustrado
 en la Figura 2.

40 Las Figuras 5A a 5D incluyen diagramas esquemáticos que ilustran un aplicador de plasma, de acuerdo con algunos
 ejemplos.

La Figura 6 incluye un diagrama esquemático en sección transversal del aplicador de plasma de las Figuras 5A a 5D,
 que ilustra la distribución del campo eléctrico en el aplicador de plasma, de acuerdo con algunos ejemplos.

45 Las Figuras 7A y 7B incluyen diagramas esquemáticos en sección transversal del aplicador de plasma de las Figuras
 5A a 5D, que ilustran perfiles de absorción de energía simulados en el aplicador de plasma, de acuerdo con algunos
 ejemplos.

Las Figuras 8A y 8B incluyen curvas de temperatura-presión del tubo de descarga de plasma para un aplicador de
 plasma anterior tal como el aplicador de plasma ilustrado en la Figura 2 y un aplicador de plasma de las modalidades
 50 ilustrativas, tal como el aplicador de plasma ilustrado en las Figuras 5A a 5D, de acuerdo con algunos ejemplos.

La Figura 9 es un gráfico de temperatura versus posición axial, que ilustra múltiples perfiles de temperatura operativos
 longitudinales o axiales para un tubo de descarga de plasma en un aplicador de plasma, de acuerdo con algunos
 ejemplos.

55 La Figura 10 incluye una vista esquemática en perspectiva de un aplicador de plasma, de acuerdo con algunas
 modalidades ilustrativas de la presente invención.

Las Figuras 11A y 11B incluyen diagramas esquemáticos de un perfil de absorción de energía operativo para el
 aplicador de plasma ilustrado en la Figura 10, de acuerdo con algunas modalidades ilustrativas de la presente
 invención.

60 Las Figuras 12A a 12D incluyen vistas esquemáticas en perspectiva de otro aplicador de plasma, de acuerdo con
 algunas modalidades ilustrativas de la presente invención.

La Figura 13 incluye un diagrama de bloques funcional esquemático y una vista en perspectiva de otro aplicador de
 plasma, con rotación de la guía de ondas controlable, de acuerdo con algunas modalidades ilustrativas de la presente
 invención.

60 Descripción detallada

65 La patente de los Estados Unidos núm. 5 625 259 (en adelante, la patente '259) describe que un campo eléctrico de
 microondas orientado en una dirección particular puede acoplarse eficientemente a un tubo de descarga de plasma
 de microondas que tiene un canal que contiene un líquido refrigerante que absorbe microondas que rodea el tubo de
 descarga de plasma en una cierta trayectoria. Por ejemplo, un campo eléctrico de microondas orientado paralelo a un

eje longitudinal que se extiende a través del centro del tubo de descarga de plasma se acoplará eficientemente al tubo de descarga de plasma que tiene un canal de enfriamiento que rodea el tubo en una trayectoria helicoidal.

5 Además, un campo eléctrico de microondas orientado en una dirección particular puede acoplarse eficientemente a una ventana dieléctrica que tiene uno o más canales en contacto con la ventana y que contiene un líquido refrigerante que absorbe microondas. Por ejemplo, un campo eléctrico de microondas orientado paralelo a la superficie de la ventana se acoplará eficientemente a un tubo de descarga de plasma que tiene uno o más canales de enfriamiento que rodean el tubo de descarga de plasma en una trayectoria helicoidal.

10 La patente '259 describe un aplicador de plasma refrigerado por fluido para fluidos que absorben microondas, que incluye un tubo de descarga de plasma formado a partir de un material sustancialmente transparente a la energía de microondas, tal como cuarzo, zafiro o alúmina. Los tubos de descarga de plasma formados de zafiro son deseables para aplicaciones que usan gases a base de flúor. Un miembro de enfriamiento rodea el tubo de descarga de plasma y define un canal formado a lo largo de una superficie interna del miembro y rodea una superficie externa del tubo de
15 descarga de plasma. La superficie externa del miembro de enfriamiento puede unirse térmicamente al tubo de descarga de plasma. El canal proporciona un conducto para transportar un fluido refrigerante que absorbe microondas sobre la superficie externa del tubo de descarga de plasma. Un medio adyacente al canal permite que un campo eléctrico de microondas ingrese al tubo de descarga de plasma y así cree y sostenga un plasma en el tubo de descarga de plasma mientras el fluido fluye a través del canal. El medio puede ser aire.

20 El canal rodea la superficie externa del tubo de descarga de plasma en una trayectoria helicoidal. Un campo eléctrico de microondas orientado paralelo a un eje longitudinal que se extiende a través del centro del tubo de descarga de plasma ingresa al tubo de descarga de plasma sin atenuarse significativamente por el fluido y, por lo tanto, permite que se forme y se sostenga un plasma. El miembro de enfriamiento puede formarse a partir de politetrafluoretileno, que es químicamente inerte y transparente a las microondas, o a partir de material de alta conductividad térmica, que
25 puede ser transparente a la microondas o reflectante. El canal dentro del miembro de enfriamiento puede conectarse a una bomba que fuerza el fluido sobre la superficie externa del tubo de descarga de plasma. El fluido puede ser agua que tiene alta conductividad térmica y es conveniente de usar.

30 La patente '259 también describe un sistema de microondas o plasma que incluye una fuente de energía de microondas, un tubo de descarga de plasma sustancialmente transparente a la energía de microondas y acoplado a la fuente, y una camisa de enfriamiento colocada circunferencialmente con respecto al tubo de descarga de plasma y sustancialmente transparente a la energía de microondas. La camisa define un canal formado a lo largo de una
35 superficie interna de la camisa en una trayectoria helicoidal para transportar un fluido tal como agua sobre la superficie externa del tubo de descarga de plasma. Un medio adyacente al canal permite que un campo eléctrico de microondas orientado paralelo a un eje longitudinal que se extiende a través del centro del tubo de descarga de plasma ingrese al tubo de descarga de plasma y sostenga un plasma mientras el agua fluye a través del canal. El sistema también incluye una bomba conectada a una fuente de agua y al canal que recircula el agua a través del canal.

40 La patente '259 también describe una ventana dieléctrica enfriada por fluido para su uso en un sistema de plasma de microondas. Un miembro de enfriamiento está en contacto con una superficie externa de la ventana dieléctrica. La ventana se forma de un material sustancialmente transparente a la energía de microondas, tal como cuarzo, zafiro o alúmina. El miembro de enfriamiento define un canal para transportar el fluido refrigerante que absorbe microondas tal como agua sobre la superficie externa de la ventana y un medio adyacente al canal. El medio, que puede ser aire,
45 permite que un campo eléctrico de microondas ingrese a través de la ventana y sostenga un plasma en la cámara mientras el fluido fluye a través del canal.

50 El canal puede formar una trayectoria en espiral sobre la superficie externa de la ventana. Un campo eléctrico orientado paralelo a la superficie de la ventana ingresa a la ventana sin atenuarse significativamente por el fluido y, por lo tanto, permite que se forme y se sostenga un plasma. El miembro de enfriamiento puede formarse a partir de politetrafluoretileno, que es químicamente inerte y transparente a las microondas, o a partir de material de alta conductividad térmica, que puede ser transparente a la microondas o reflectante. El canal dentro del miembro puede conectarse a una bomba que fuerza el fluido sobre la superficie externa del tubo de descarga de plasma.

55 La Figura 1 incluye una vista esquemática en sección transversal de un aplicador de plasma de microondas refrigerado por líquido 1 de la técnica anterior. El aplicador 1 incluye un tubo de descarga de plasma dieléctrico 10. El tubo de descarga de plasma 10 se hace de un material que es sustancialmente transparente a la energía de microondas y que tiene propiedades mecánicas, térmicas y químicas adecuadas para el procesamiento de plasma. Los materiales típicos incluyen cuarzo, zafiro y alúmina. Una entrada de gas 12 colocada en una parte superior 14 del tubo de descarga de
60 plasma 10 permite que los gases de proceso se introduzcan en el tubo de descarga de plasma 10. Una parte inferior 16 del tubo de descarga de plasma 10 se acopla a una cámara de vacío 18. Se usa una bomba de vacío 19 para evacuar la cámara 18. Durante el procesamiento, las especies de gas reactivo generadas en el tubo de descarga de plasma 10 fluyen aguas abajo hacia la cámara 18.

65 Un magnetrón 20 genera la energía de microondas requerida para crear y sostener un plasma en el tubo de descarga de plasma 10. Una salida 22 del magnetrón 20 se acopla a un circulador 24, que permite que la energía de microondas

pase sin restricciones a una guía de ondas 26, que se acopla al tubo de descarga de plasma 10 para transportar la energía al tubo de descarga de plasma 10. El circulador 24 dirige la energía de microondas reflejada por el tubo de descarga de plasma 10 a una carga ficticia 28 para no dañar el magnetrón 20. Un sintonizador 30 minimiza la energía reflejada al perturbar el campo electromagnético en la guía de ondas 26.

5 Una camisa de enfriamiento 32 con una entrada 34 y una salida 36 rodea el tubo de descarga de plasma 10. Una bomba 38 acoplada a la camisa 32 fuerza el líquido refrigerante hacia la entrada 34, a través de la camisa 32, y a través de la salida 36 de regreso a la bomba 38. El líquido contacta directamente con toda la superficie externa del tubo de descarga de plasma 10. Por lo tanto, la energía de microondas en la guía de ondas 26 debe viajar a través del líquido para alcanzar el tubo de descarga de plasma 10. Si el líquido absorbe significativamente la energía de microondas, la energía en la guía de ondas 26 no se acopla suficientemente al tubo de descarga de plasma 10 para formar y sostener un plasma.

15 Por lo tanto, en esta configuración, solo los líquidos que no absorben significativamente la energía de microondas se usan en el aplicador de plasma de microondas refrigerado por líquido 1. Los ejemplos de tales líquidos incluyen aceites de silicona, ciertos clorofluorocarbonos y diversos compuestos de hidrocarburos. Desafortunadamente, tales fluidos son ambientalmente indeseables y costosos. Muchos de estos fluidos también son peligrosos para los trabajadores y requieren procedimientos de manipulación complejos. Además, la mayoría de estos líquidos requieren el uso de intercambiadores de calor de circuito cerrado que aumentan significativamente el costo y la complejidad del sistema. Además, si el tubo de descarga de plasma 10 se rompiera, estos fluidos contaminarían el equipo de procesamiento.

25 La Figura 2 incluye una vista esquemática en sección transversal de un aplicador de plasma de microondas refrigerado por líquido 2 de la técnica anterior, que puede usar fluidos que absorben microondas. El aplicador 2 de la Figura 2 incluye un tubo de descarga de plasma dieléctrico 50 que puede hacerse de un material que es sustancialmente transparente a la energía de microondas y que tiene propiedades mecánicas, térmicas y químicas adecuadas para el procesamiento de plasma. Tales materiales incluyen cuarzo, zafiro y alúmina. Una entrada de gas 52 colocada en una parte superior 54 del tubo de descarga de plasma 50 permite que los gases de proceso se introduzcan en el tubo de descarga de plasma 50. Una parte inferior 56 del tubo de descarga de plasma 50 se acopla a una cámara de vacío 58. Las especies de gas reactivo generadas en el tubo de descarga de plasma 50 fluyen aguas abajo hacia la cámara 58.

35 Una camisa de enfriamiento 60 con una entrada 62 y una salida 64 rodea una superficie externa 66 del tubo de descarga de plasma 50. La camisa 60 se forma de un material que es sustancialmente transparente a la energía de microondas, tal como, por ejemplo, politetrafluoretileno. La camisa 60 incluye un canal 68 formado a lo largo de una superficie interna 70 de la camisa 60 que rodea la superficie externa del tubo de descarga de plasma 50. El canal 68 proporciona un conducto para transportar un fluido refrigerante que absorbe microondas directamente sobre la superficie externa del tubo de descarga de plasma 50. El fluido puede ser agua.

40 El canal 68 fuerza al fluido refrigerante a tomar una trayectoria particular alrededor de la superficie externa del tubo de descarga de plasma 50. La trayectoria se elige para maximizar el área del tubo de descarga de plasma 50 expuesta al fluido refrigerante. Sin embargo, la trayectoria deja suficiente espacio para permitir que un campo eléctrico de microondas con cierta orientación ingrese al tubo de descarga de plasma y forme y sostenga la descarga de plasma. En algunas modalidades ilustrativas, el canal rodea la superficie externa del tubo de descarga de plasma 50 en una trayectoria helicoidal, lo que deja una pequeña separación entre los bucles de la trayectoria.

45 Una guía de ondas 72 transporta la energía de microondas necesaria para crear y sostener un plasma en el tubo de descarga de plasma 50 desde el magnetrón (no mostrado en la Figura 2) hasta el tubo de descarga de plasma 50. En algunas modalidades ilustrativas particulares, el campo eléctrico de microondas se orienta paralelo a un eje longitudinal 74 que se extiende a través de un centro 76 del tubo de descarga de plasma 50. Esta orientación permite que la energía de microondas penetre fácilmente en el tubo de descarga de plasma 50 entre los bucles del canal helicoidal 68 sin atenuarse significativamente por el fluido y, por lo tanto, permitirá que se forme y se sostenga un plasma.

50 Aunque la energía de microondas se especifica como la fuente para crear la descarga de plasma, se observa que esta descripción se aplica al uso de fuentes de energía de radiofrecuencia (RF). Además, aunque se especifica el uso de líquidos refrigerantes que absorben microondas, se observa que los sistemas que incorporan la invención pueden utilizar líquidos refrigerantes no absorbentes.

55 La Figura 3 incluye un diagrama esquemático en sección transversal de una modalidad ilustrativa de la camisa de enfriamiento ilustrada en la Figura 2. Con referencia a la Figura 3, un tubo de enfriamiento 80 con una entrada 82 y una salida 84 se envuelve alrededor del tubo de descarga de plasma 86. El tubo de enfriamiento 80 rodea preferentemente la superficie externa del tubo de descarga de plasma 86 en una trayectoria helicoidal, lo que deja una pequeña separación 88 entre los bucles de la trayectoria. En algunas modalidades ilustrativas particulares, el campo eléctrico de microondas se orienta paralelo a un eje longitudinal 90 que se extiende a través de un centro 92 del tubo de descarga de plasma 86. Esta orientación permite que la energía de microondas penetre fácilmente en el tubo de descarga de plasma 86 entre los bucles del canal helicoidal sin atenuarse significativamente por el fluido y, por lo

tanto, permite que se forme y se sostenga un plasma. El tubo de enfriamiento 80 puede ser metálico o no metálico y puede unirse térmicamente a la superficie externa del tubo de descarga de plasma 86.

Es deseable que un aplicador de plasma tal como los descritos anteriormente en relación con las Figuras 1-3 produzca adecuadamente gases de alto flujo, libres de contaminación, activados químicamente, necesarios para aplicaciones industriales. Como se describió anteriormente, el aplicador de plasma de microondas 2 ilustrado en la Figura 2 incluye una cavidad de microondas y un tubo de descarga de plasma dieléctrico 50 con una bobina de enfriamiento helicoidal 80. La dirección del campo eléctrico de microondas en la guía de ondas 72 se orienta en paralelo con el eje longitudinal 74 del tubo de descarga de plasma 50. Debido a que los bucles de la bobina de enfriamiento helicoidal 80 son casi perpendiculares al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 50, la orientación del campo eléctrico permite que la energía de microondas penetre fácilmente en el tubo de descarga de plasma 50 entre las vueltas o bucles de la bobina helicoidal 80.

En el dispositivo de la Figura 2, la absorción de energía de microondas está altamente localizada. Las Figuras 4A y 4B incluyen perfiles esquemáticos de absorción de energía para el aplicador de plasma 2 ilustrado en la Figura 2. Específicamente, la Figura 4A incluye un perfil de absorción de energía para el aplicador de plasma 2 de la Figura 2 que se observa en la dirección perpendicular a la guía de ondas 72. La Figura 4B incluye un perfil de absorción de energía para el aplicador de plasma 2 de la Figura 2 que se observa en la dirección a lo largo de la guía de ondas 72. Como se puede observarse en las Figuras 4A y 4B, el perfil de absorción de energía en el tubo de descarga de plasma 50 se concentra en la región que orienta la entrada de microondas hacia el tubo de descarga de plasma 50. La alta densidad de potencia máxima provoca una erosión excesiva del canal de plasma por los gases reactivos y los plasmas. Además, el flujo de calor máximo cerca de la entrada de la guía de ondas es alto, lo que crea fuertes tensiones térmicas mecánicas que pueden hacer que el tubo de descarga de plasma dieléctrico 50 se rompa. Como resultado, la potencia operativa máxima de este tipo de aplicador de plasma 2 se limita a aproximadamente 3 kW.

Los dispositivos de plasma acoplados inductivamente y capacitivamente pueden usarse para generar gases activados, pero también sufren limitaciones severas. Los plasmas acoplados capacitivamente son energéticamente ineficientes en la generación de gases reactivos. A medida que las corrientes eléctricas terminan en los electrodos de descarga, se pierde una fracción significativa de energía en los electrodos, lo que reduce así la energía disponible para la excitación del gas. Además, se generan electrones e iones de alta energía en las superficies de los electrodos, lo que resulta en una mayor erosión de la superficie de la fuente de plasma. Esto conduce a una alta contaminación química y de partículas y reduce la vida útil del producto.

Los plasmas acoplados inductivamente pueden tener mayores eficiencias energéticas en comparación con las descargas acopladas capacitivamente. Sin embargo, es difícil eliminar completamente el acoplamiento capacitivo en un dispositivo de plasma acoplado inductivamente. Para lograr una alta eficiencia de acoplamiento magnético, los núcleos magnéticos pueden usarse en un dispositivo de plasma inductivo, tal como, por ejemplo, en un generador de plasma toroidal del tipo descrito en la patente de los Estados Unidos núm. 6 150 628. El uso de la geometría toroidal limita la selección de materiales que pueden usarse para formar la cámara de plasma. Los metales, los metales recubiertos o la cerámica, tales como el aluminio, el aluminio anodizado o la cerámica de alúmina, se usan para formar cámaras de plasma toroidales. Sin embargo, es difícil usar materiales de cristal único tal como el zafiro para formar la cámara de plasma. Esto ha limitado el uso de fuentes inductivas de plasma en aplicaciones donde se necesita baja contaminación química y de partículas.

De acuerdo con algunas modalidades ilustrativas, se proporciona un aplicador de plasma de microondas que tiene una uniformidad mejorada de deposición de potencia, mayor capacidad de potencia y menor contaminación en comparación con los aplicadores de plasma de microondas anteriores. El aplicador de las modalidades ilustrativas incluye una cavidad de microondas y un tubo de descarga de plasma dieléctrico rodeado por una bobina de enfriamiento eléctricamente conductora. En algunas modalidades ilustrativas particulares, la bobina de enfriamiento conductora puede enrollarse helicoidalmente en el exterior del tubo de descarga de plasma. La dirección del campo eléctrico de microondas en la guía de ondas está en ángulo entre 30° y 90°, y preferentemente entre 45° y 90°, con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma. Al tener un componente del campo eléctrico en paralelo con los bucles de la bobina conductora, se induce una corriente eléctrica en la bobina de enfriamiento conductora. La corriente eléctrica fluye a lo largo de la bobina de enfriamiento conductora, lo que hace que la energía de microondas se propague longitudinal y azimutalmente alrededor del tubo de descarga de plasma dieléctrico, lo que hace que la energía de microondas se absorba de manera más uniforme en el plasma.

Las Figuras 5A a 5D incluyen diagramas esquemáticos que ilustran un aplicador de plasma 100, de acuerdo con algunos ejemplos. Específicamente, la Figura 5A incluye una vista esquemática en perspectiva, parcialmente cortada del aplicador de plasma 100, de acuerdo con los ejemplos; la Figura 5B incluye una vista lateral esquemática del aplicador de plasma 100, de acuerdo con los ejemplos; y la Figura 5C incluye una vista esquemática en sección transversal del aplicador de plasma 100, tomada a lo largo de la línea A-A de la Figura 5B, de acuerdo con los ejemplos. La Figura 5D incluye una vista esquemática en sección transversal detallada del tubo de descarga de plasma con una bobina de enfriamiento helicoidal conductora circundante, de acuerdo con algunos ejemplos.

En el ejemplo del aplicador de plasma 100 ilustrado en las Figuras 5A a 5C, la guía de ondas 172 se orienta de manera que la dirección del campo eléctrico es 90° desde el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma dieléctrico 150. En algunos ejemplos, la guía de ondas 172 tiene una sección transversal rectangular, con un lado más ancho que define un eje principal de sección transversal 170 de la guía de ondas 172 y un lado más estrecho que define un eje secundario de sección transversal 171 de la guía de ondas 172. La guía de ondas 172 se orienta de manera que el eje principal de sección transversal 170 de la guía de ondas 172 está en paralelo con el eje longitudinal 151 del tubo de descarga de plasma 150. En su modo fundamental, el campo eléctrico de microondas en la guía de ondas 172 está principalmente en paralelo con el eje secundario de sección transversal 171 de la guía de ondas 172 (véase la Figura 12B). La energía de microondas se acopla o guía a la cavidad 152 a través de la guía de ondas 172. El tubo de descarga de plasma dieléctrico 150, que se rodea por una bobina de enfriamiento conductora 160, se ubica en el centro de la cavidad 152. La bobina de enfriamiento conductora 160 se une térmicamente al tubo de descarga de plasma 150 para eliminar el calor del tubo de descarga de plasma 150. En algunos ejemplos, la bobina de enfriamiento conductora puede enrollarse helicoidalmente alrededor del exterior del tubo de descarga de plasma 150, como se ilustra en el ejemplo de las Figuras 5A-5D. La separación entre los bucles adyacentes puede seleccionarse para controlar la temperatura del tubo de descarga de plasma. La separación entre los bucles adyacentes puede seleccionarse para minimizar la temperatura del tubo de descarga de plasma mientras se garantiza la propagación de los campos de microondas.

En algunas modalidades, la separación entre los bucles adyacentes de la bobina de enfriamiento conductora puede ser ajustable en el tubo de descarga de plasma para que pueda ajustarse de acuerdo con la impedancia de plasma y/o el nivel de la energía de microondas. Con ese fin, en algunas modalidades, la bobina de enfriamiento conductora puede hacerse de tubos metálicos flexibles. Pueden colocarse formas dieléctricas o separadores en la bobina de enfriamiento conductora para establecer la separación entre los bucles adyacentes. Los tubos flexibles pueden hacerse de un metal blando tal como el cobre, o pueden tener una estructura elástica similar a un fuelle, o pueden tener un mecanismo flexible similar a los usados en los tubos de cuello de cisne. La separación puede ajustarse, por ejemplo, para mejorar la uniformidad de la deposición de potencia en el tubo de descarga de plasma. En general, en algunas modalidades, la separación entre los bucles adyacentes de la bobina de enfriamiento conductora puede ajustarse para obtener cualquier perfil de potencia deseado en el tubo de descarga de plasma.

Con las vueltas o bucles helicoidales de la bobina de enfriamiento conductora 160 casi en paralelo con los campos eléctricos en la guía de ondas 172, se induce una corriente eléctrica en la bobina de enfriamiento conductora 160. La corriente fluye a lo largo de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160, lo que ayuda a propagar la energía de microondas a lo largo del eje longitudinal 151 del tubo de descarga de plasma 150. También pueden usarse otras formas de guía de ondas, tal como la guía de ondas circular u ovalada, de acuerdo con los ejemplos.

En un ejemplo, la bobina de enfriamiento conductora 160 puede hacerse a partir de un tubo de cobre con un fluido refrigerante que fluye dentro del tubo de cobre. El uso de un tubo de enfriamiento de sección transversal cuadrada o rectangular es ventajoso para proporcionar un área de contacto más grande entre el tubo de plasma dieléctrico 150 y la bobina de enfriamiento 160, lo que mejora así la conductancia térmica desde el tubo de plasma dieléctrico 150 hasta la bobina de enfriamiento 160. El fluido refrigerante puede ser cualquiera de los fluidos refrigerantes descritos anteriormente. En algunos ejemplos, el fluido refrigerante es agua. En algunos ejemplos, los estranguladores de microondas 154, etiquetados específicamente como 154A, 154B, 154C y 154D en la Figura 5D, se ubican en los extremos de la estructura de enfriamiento para evitar fugas de energía de microondas desde la cavidad de microondas 152. La estructura de enfriamiento puede incluir una entrada de fluido 156 por la cual el fluido refrigerante, por ejemplo, agua, entra en la bobina de enfriamiento 160 y una salida de fluido 158 por la cual el fluido refrigerante sale de la bobina de enfriamiento 160. El gas entra en el tubo de plasma dieléctrico 150 a través de una entrada de gas 159. De acuerdo con algunos ejemplos, se usa un sensor de temperatura 157 para monitorear el perfil de temperatura del exterior del tubo de descarga de plasma 150. El sensor de temperatura 157 puede ser un arreglo de sensores térmicos infrarrojos, colocados en la cavidad de microondas 152 y a lo largo del eje longitudinal 151, para monitorear la temperatura y el perfil de temperatura del exterior del tubo de descarga de plasma 150. La señal de temperatura se transmite a un sistema de control y se usa para proteger el tubo de descarga de plasma 150 y para optimizar los procesos. Un sensor óptico 164 puede instalarse en la cavidad de microondas 152 para monitorear las emisiones de luz desde el plasma. El sensor óptico se activa cuando se enciende un plasma en el tubo de plasma dieléctrico 150. La señal indica la formación de plasma después del encendido de la energía de microondas, y puede usarse para controlar los parámetros de proceso posteriores. Opcionalmente, un sensor de presión (no mostrado) puede conectarse de forma fluida al tubo de plasma dieléctrico 150 para monitorear la presión de gas en el tubo de plasma dieléctrico durante un proceso.

La Figura 6 incluye un diagrama esquemático en sección transversal del aplicador de plasma 100, que ilustra la distribución del campo eléctrico en el aplicador de plasma 100. La pared posterior 174 de la guía de ondas 172, que se ilustra en la Figura 6 en el lado izquierdo de la cavidad 152, se selecciona para ser aproximadamente la mitad de una longitud de onda ($\approx \lambda/2$) desde el radio exterior de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160, lo que induce una corriente eléctrica máxima en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 mientras mantiene las intensidades del campo eléctrico simétricas en los dos lados del tubo de descarga de plasma 150. De acuerdo con algunos ejemplos, el diámetro del tubo de descarga de plasma dieléctrico 150 puede estar entre 1 y 10 cm, y la longitud del tubo de descarga de plasma 150 puede estar entre 10 y 100 cm.

Las Figuras 7A y 7B incluyen diagramas esquemáticos en sección transversal del aplicador de plasma 100, que ilustran perfiles de absorción de energía simulados en el aplicador de plasma 100, de acuerdo con algunos ejemplos. La Figura 7A se orienta en la dirección perpendicular a la guía de ondas 172, y la Figura 7B se orienta en la dirección a lo largo de la guía de ondas 172. Los perfiles de absorción de energía simulados de las Figuras 7A y 7B corresponden a la distribución de campo eléctrico ilustrada en la Figura 6. Las Figuras 7A y 7B ilustran que, de acuerdo con los ejemplos, la energía de microondas se absorbe a lo largo de todo el tubo de descarga de plasma 150, con algunas estructuras de ondas debido a la longitud de onda finita de la microonda.

El perfil de absorción de energía ilustrado en las Figuras 7A y 7B ilustra que la absorción de energía de microondas se extiende a toda la longitud del tubo de descarga de plasma 150. El acoplamiento de energía entre la corriente de microondas que fluye en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 y el plasma es relativamente débil. La energía de microondas puede propagarse hasta 50-100 cm en la dirección longitudinal del tubo de descarga de plasma 150. La absorción de energía tiene una estructura ondulada a lo largo del eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 150 debido a la longitud de onda finita de la microonda. Dado que la energía de microondas se acopla desde el exterior del tubo de descarga de plasma dieléctrico 150, la absorción de energía también se produce en el radio exterior de la columna de plasma. El perfil de absorción de energía de las Figuras 7A y 7B es significativamente más uniforme en comparación con el aplicador de plasma 2 de las Figuras 2, 4A y 4B.

Como se describió anteriormente en detalle y se ilustra en las Figuras 5D, 6, 7A y 7B, de acuerdo con los ejemplos, los estranguladores de microondas 154, etiquetados específicamente como 154A, 154B, 154C y 154D en la Figura 5D, se ubican en los extremos de la estructura de enfriamiento para evitar fugas de energía de microondas desde la cavidad de microondas 152. Un estrangulador es una línea de derivación de cortocircuito de aproximadamente un cuarto de longitud de onda de largo. La abertura del estrangulador 154 se orienta hacia el tubo de descarga de plasma. En un extremo de cortocircuito de cada estrangulador 154, el campo eléctrico es mínimo, mientras que la corriente es máxima. A un cuarto de longitud de onda alejado, el campo eléctrico es máximo y la corriente es mínima. Se produce una alta impedancia en la abertura del estrangulador que se orienta hacia el tubo de descarga de plasma, lo que evita una mayor propagación de la energía de microondas a lo largo del tubo. De acuerdo con los ejemplos, una 'estructura de doble estrangulador', en la que se disponen dos estranguladores en cada extremo del tubo de descarga de plasma. El uso de una estructura de doble estrangulador de acuerdo con los ejemplos reduce el campo eléctrico de microondas en dos órdenes de magnitud (cuatro órdenes de magnitud en potencia), en contraste con una estructura de estrangulador único en la que el campo eléctrico puede reducirse en un solo orden de magnitud. Esta reducción en el campo eléctrico de microondas y la potencia al final del tubo de descarga de plasma bloquea o reduce sustancialmente la cantidad de campo eléctrico de microondas y la potencia que se escapa al final del tubo. Como resultado, puede utilizarse una potencia mucho mayor dentro del tubo de descarga de plasma. Debe observarse que los estranguladores 154 ilustrados en las Figuras 6, 7A y 7B son estranguladores rectos, mientras que los estranguladores 154A, 154B, 154C y 154D ilustrados en la Figura 5D son estranguladores plegados. Siempre que sus longitudes eléctricas sean las mismas, los estranguladores rectos y los plegados tienen las mismas características operativas. La presente descripción puede aplicarse tanto a los estranguladores plegados como a los estranguladores rectos.

De acuerdo con las modalidades ilustrativas, la absorción de energía uniforme es un beneficio para una fuente de plasma de alta potencia, ya que la capacidad de potencia máxima de un dispositivo a menudo se limita por la carga de calor máxima. La mejora de la uniformidad de potencia reduce el flujo de calor máximo y la temperatura de la superficie, lo que conduce a una menor tensión termomecánica en el tubo de descarga de plasma. Los estranguladores de microondas 154 ubicados en los extremos de la cavidad del aplicador de plasma 152 reflejan y confinan la energía de microondas dentro de la cavidad del aplicador 152. Como resultado, está disponible un amplio intervalo para la selección de la longitud del aplicador de plasma 100. Por lo tanto, el aplicador de plasma 100 de los ejemplos es modificable para acomodar diversos requisitos de potencia y químicas de gas. En el ejemplo particular del aplicador de plasma 100 de las Figuras 5A a 5D, puede usarse una frecuencia de microondas de 2,54 GHz. Se entenderá que la presente descripción puede aplicarse a frecuencias de microondas en el intervalo de 800 MHz a 30 GHz.

Las Figuras 8A y 8B incluyen curvas de temperatura-presión del tubo de descarga de plasma para un aplicador de plasma de la técnica anterior tal como el aplicador de plasma 2 ilustrado en la Figura 3 y un aplicador de plasma de los ejemplos, tal como el aplicador de plasma 100 ilustrado en las Figuras 5A a 5D. En los gráficos de las Figuras 8A y 8B, las curvas discontinuas son para el aplicador anterior 2, y las curvas sólidas son para el aplicador 100 de los ejemplos. Para cada uno de los experimentos operativos en los que se basan los dos pares de curvas, los dos aplicadores de plasma que se probaron eran de tamaño idéntico y tenían estructuras de enfriamiento idénticas, y se operaron bajo condiciones de gas idénticas. En las curvas de la Figura 8A, ambos aplicadores se operaron a una potencia de 1,5 kW y, en las curvas de la Figura 8B, ambos aplicadores se operaron a una potencia de 3 kW. Como se ilustra en las Figuras 8A y 8B, el aplicador de plasma 100 de los ejemplos, en el que la orientación del campo eléctrico gira 90° con respecto a la del aplicador de plasma anterior 2, es 40-50 % más frío que el aplicador de plasma 2 de la técnica anterior.

La Figura 9 es un gráfico de temperatura versus posición axial, que ilustra múltiples perfiles de temperatura operativos longitudinales o axiales para un tubo de descarga de plasma 150 en un aplicador de plasma 100, de acuerdo con algunos ejemplos. Las múltiples curvas de la Figura 9 ilustran varios perfiles de temperatura bajo diversas condiciones de flujo de gas y potencia. El aplicador de plasma 100 funciona con una potencia de microondas de hasta 6 kW, que

es aproximadamente el doble de la potencia máxima de funcionamiento del aplicador de plasma 2 anterior, mientras que la temperatura máxima del tubo de descarga de plasma 100 está por debajo de la del aplicador de plasma 2 anterior. Dado que la longitud del aplicador de plasma 100 es modificable, la capacidad de potencia puede aumentar, si es necesario.

De acuerdo con algunos ejemplos, para mejorar aún más la uniformidad de la deposición de potencia en el plasma, el ángulo de inclinación de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 puede variar a lo largo del eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 150. Es decir, la separación entre los bucles en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 150 puede variar para mejorar la uniformidad del perfil de absorción de energía y/o para obtener un perfil de absorción de energía deseado.

La bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 en el tubo de descarga de plasma 150 cumple múltiples funciones, a saber, propagar y acoplar la energía de microondas al plasma y proporcionar enfriamiento al tubo de descarga de plasma dieléctrico 150. A medida que aumenta la energía de microondas, aumentan las tensiones termomecánicas en el tubo de descarga de plasma 150. Como se describió anteriormente, en los ejemplos, para maximizar la capacidad de potencia del tubo de descarga de plasma 150, la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 puede hacerse de tuberías, y un fluido refrigerante puede fluir dentro de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 para eliminar el calor del tubo de descarga de plasma 150. Un material de unión térmica conformada térmicamente conductor, por ejemplo, un compuesto de silicona térmica, puede usarse para unir la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 al tubo de descarga de plasma dieléctrico 150. De acuerdo con algunos ejemplos, la separación entre los bucles adyacentes de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 puede seleccionarse en base a la optimización de los requisitos de propagación/acoplamiento de microondas y de conducción térmica. Cuando la separación se estrecha, los campos eléctricos entre los bucles adyacentes aumentan, lo que puede aumentar la corriente inducida en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 y, por lo tanto, el acoplamiento y la propagación de la energía de microondas al tubo de descarga de plasma 150 y a lo largo del eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 150. Sin embargo, el estrechamiento del espacio también puede provocar arcos eléctricos en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160. Para mitigar esta posibilidad, puede depositarse un material dieléctrico para llenar la separación entre los bucles adyacentes para elevar el umbral del arco. Por el contrario, cuando se amplía la separación entre los bucles, se reduce la conductancia térmica desde el tubo de descarga de plasma dieléctrico 150 hasta el fluido refrigerante que fluye dentro de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160, lo que puede resultar en una mayor tensión termomecánica y, a veces, una mayor erosión del plasma en el tubo de descarga de plasma dieléctrico 150. En algunos ejemplos, la separación preferida entre los bucles de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora 160 para un tubo de descarga de plasma de microondas 150 que opera a 1-10 kW de potencia puede estar en el intervalo de 0,2 a 1 cm.

La Figura 10 incluye una vista esquemática en perspectiva de un aplicador de plasma 200, de acuerdo con otra modalidad ilustrativa de la presente invención. El aplicador de plasma 200 de la Figura 10 es el mismo en muchos aspectos que el aplicador de plasma 100 de las Figuras 5A a 5D, con la excepción principal de que, en el aplicador de plasma 200 de la Figura 10, la guía de ondas 272 gira alrededor de su eje longitudinal con respecto al tubo de descarga de plasma 250, como se indica por la flecha 273, de manera que el eje secundario de sección transversal 271 de la guía de ondas 272, y por lo tanto, el campo eléctrico de microondas, forma un ángulo predeterminado con respecto al eje longitudinal 251 del tubo de descarga de plasma 250. Salvo que se indique lo contrario, la descripción anterior con respecto al aplicador de plasma 100 de las Figuras 5A a 5D se aplica al aplicador de plasma 200 de la Figura 10.

Con referencia a la Figura 10, en esta modalidad ilustrativa particular, el ángulo predeterminado entre el eje secundario de sección transversal 271 de la guía de ondas 272 y el eje longitudinal 251 del tubo de descarga de plasma 250 se ilustra que es 60°, en lugar del ángulo de 90° en el aplicador de plasma 100 de las Figuras 5A a 5D. El uso de un ángulo agudo entre el campo eléctrico de microondas y el eje longitudinal 251 del tubo de descarga de plasma 250 es particularmente útil para depositar uniformemente la energía de microondas en un tubo de descarga de plasma relativamente corto 250. Además, al igual que el aplicador de plasma 100, en el aplicador de plasma 200 de la Figura 10, los bucles de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora (no mostrada) son casi perpendiculares al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 250. Con la dirección del campo eléctrico en ángulo desde los bucles de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora, existe un componente perpendicular y un componente paralelo del campo eléctrico con respecto a los bucles de la bobina de enfriamiento helicoidal conductora. El campo eléctrico perpendicular, E_{\perp} , puede penetrar la bobina de enfriamiento helicoidal conductora con relativa facilidad y ser absorbido localmente. El campo eléctrico paralelo, E_{\parallel} , induce una corriente eléctrica en la bobina de enfriamiento helicoidal conductora, y ayuda a propagar la energía de microondas a lo largo del eje longitudinal del tubo de descarga de plasma 250. El ajuste del ángulo entre el campo eléctrico de microondas y la bobina de enfriamiento helicoidal conductora cambia las fuerzas relativas de E_{\perp} y E_{\parallel} , lo que permite la optimización del perfil de absorción de energía en el tubo de descarga de plasma 250.

Las Figuras 11A y 11B incluyen diagramas esquemáticos de un perfil de absorción de energía operativo para el aplicador de plasma 200 ilustrado en la Figura 10. Específicamente, la Figura 11A incluye una vista esquemática en sección transversal del perfil de absorción de energía de microondas observado en una dirección perpendicular a la dirección de la guía de ondas 272, y la Figura 11B incluye una vista esquemática en sección transversal del perfil de

absorción de energía de microondas observado en la dirección a lo largo de la guía de ondas 272. En esta modalidad ilustrativa, el ángulo entre el eje secundario de sección transversal 271 de la guía de ondas 272 y el eje longitudinal 251 del tubo de descarga de plasma 250 es 60°. En este ángulo, la uniformidad de la absorción de energía de microondas se optimiza para un tubo de descarga de plasma dieléctrico de 3,8 cm de diámetro y 20 cm de longitud, como se ilustra en las Figuras 11A y 11B.

Las Figuras 12A a 12D incluyen vistas esquemáticas en perspectiva de otro aplicador de plasma 200A, en el que el ángulo entre el eje secundario de sección transversal de la guía de ondas, es decir, el campo eléctrico de microondas ilustrado por flechas o vectores etiquetado "E" y el eje longitudinal del tubo de descarga de plasma puede ajustarse en tiempo real, de acuerdo con algunas modalidades ilustrativas. Con referencia a la Figura 12A, el aplicador de plasma 200A es el mismo que el aplicador de plasma 200 de la Figura 10, con la excepción de que el aplicador de plasma 200A incluye las uniones flexibles o giratorias 275 y 276 mediante las cuales la guía de ondas 272A se acopla a la cavidad de microondas 252A y al tubo de descarga de plasma 250A. Las uniones flexibles o giratorias 275 y 276 permiten la rotación de la guía de ondas 272A con relación al tubo de descarga de plasma 250A, como se indica por la flecha 273A, de manera que el ángulo del campo eléctrico de microondas con relación al tubo de descarga de plasma 250A puede ajustarse en tiempo real, por ejemplo, para igualar cargas de plasma específicas.

Las Figuras 12B a 12D ilustran una modalidad ilustrativa de las uniones giratorias 275 y 276 mostradas en la Figura 12A. Cada unión giratoria comprende dos pestañas circulares, una fija en la cavidad de microondas 252A y la otra fija en la guía de ondas 272A. La dirección del campo eléctrico de microondas de orden más bajo en las guías de ondas está principalmente en paralelo con el eje secundario de sección transversal, como se ilustra por las flechas o vectores etiquetados "E" en las Figuras 12B y 12D. Los ángulos entre la cavidad de microondas 252A y las guías de ondas que se orientan hacia el lado frontal y posterior de la cavidad pueden ajustarse al girar las secciones de guía de ondas con relación a la cavidad de microondas. Una vez que se obtiene un ángulo deseado, las pestañas 262A y 262B (o 263A y 263B) pueden sujetarse y bloquearse. En algunas modalidades, las superficies de las pestañas de interconexión están en contacto eléctrico para evitar que las microondas se escapen de la unión. En algunas otras modalidades, como se muestra en la Figura 12C, un estrangulador de microondas 264 se ensambla en las pestañas de guía de ondas 263A o 263B. El uso del estrangulador de microondas 264 evita la fuga de microondas de las uniones giratorias cuando las pestañas de guía de ondas no están en contacto eléctrico. Esto hace que sea más conveniente ajustar el ángulo relativo de las uniones giratorias.

En algunas modalidades ilustrativas, la rotación de la guía de ondas con relación al tubo de descarga de plasma puede controlarse con precisión de manera que el ángulo del campo eléctrico de microondas con relación al tubo de descarga de plasma pueda ajustarse en tiempo real. Como resultado, se realiza el ajuste en tiempo real del perfil de absorción de energía de microondas, y/o la distribución del campo electromagnético y/o la distribución de temperatura dentro del tubo de descarga de plasma. La Figura 13 incluye una vista esquemática en perspectiva de un aplicador de plasma con rotación de guía de ondas controlable, de acuerdo con algunas modalidades ilustrativas. Con referencia a la Figura 13, la rotación de la guía de ondas 372 con relación al tubo de descarga de plasma 250A puede controlarse a través de un bucle de retroalimentación mediante un procesador/controlador 314, uno o más controladores de accionamiento 318A, 318B y uno o más actuadores 320A, 320B.

Como se muestra en la Figura 13, el tubo de descarga de plasma 250A puede configurarse con uno o más sensores de campo electromagnético 310 y/o uno o más sensores de temperatura 312. Se entenderá que puede emplearse cualquier número de sensores de campo electromagnético 310 y cualquier número de sensores de temperatura 312, que incluye ningún sensor de campo electromagnético o ningún sensor de temperatura de acuerdo con las modalidades ilustrativas, y los sensores pueden ubicarse físicamente en una variedad de posiciones en y/o cerca del tubo de descarga de plasma 250, de acuerdo con las modalidades ilustrativas. Todos y cada uno de los sensores de campo electromagnético en cualquiera y todas las ubicaciones se representan colectivamente y se referencian en la Figura 13 por el número de referencia 310. De manera similar, todos y cada uno de los sensores de temperatura en cualquiera y todas las ubicaciones se representan colectivamente y se referencian en la Figura 13 por el número de referencia 312.

Los sensores de campo electromagnético 310 pueden proporcionar señales indicativas de la intensidad y uniformidad del campo electromagnético en y/o cerca del tubo de descarga de plasma 250A al procesador/controlador 314. Los sensores de temperatura 312 pueden proporcionar señales indicativas de la temperatura y su uniformidad en y/o cerca del tubo de descarga de plasma 250A al procesador/controlador 314. El procesador/controlador 314 procesa las señales recibidas para determinar si se logra un campo electromagnético y/o una absorción de energía y/o un perfil de temperatura deseado. El procesador/controlador 314 genera entonces señales de control de accionamiento y reenvía las señales a uno o ambos controladores del actuador 318A, 318B, que controlan el movimiento, tal como, por ejemplo, el desplazamiento longitudinal, de los brazos del actuador 320A, 320B, respectivamente. El brazo del actuador 320A controla la rotación de la sección frontal o inferior 372A de la guía de ondas 372 alrededor de la unión giratoria 276, y el brazo del actuador 320B controla la rotación de la sección posterior o superior 372B de la guía de ondas 372 alrededor de la unión giratoria 275. Por lo tanto, en algunas modalidades ilustrativas, mediante el uso de la retroalimentación proporcionada por los sensores electromagnéticos 310 y/o los sensores de temperatura 312, el procesador/controlador 314 controla la rotación de la guía de ondas 372 con relación al tubo de descarga de plasma

250A para lograr un perfil electromagnético, de absorción de energía y/o temperatura deseado dentro del tubo de descarga de plasma 250A.

5 En algunas modalidades ilustrativas, puede ser aceptable o deseable girar ambas secciones 372A y 372B al mismo ángulo con respecto al tubo de descarga de plasma 250A. En tales modalidades, solo se requiere uno de los controladores de accionamiento 318A, 318B; puede eliminarse uno de los controladores de accionamiento 318A, 318B. En este caso, puede usarse un miembro de fijación rígido opcional 378 para unir las secciones de guía de ondas 372A y 372B de manera que, cuando una de ellas se acciona para la rotación, la otra se lleva a la misma rotación a través de la fijación rígida proporcionada por el elemento de fijación rígido 378.

10 En algunas modalidades ilustrativas, la entrada del usuario también puede proporcionarse por un usuario para controlar manualmente la rotación de la guía de ondas 372 con respecto al tubo de descarga de plasma 250A. Esta entrada del usuario puede ser adicional al control de circuito cerrado facilitado por los sensores electromagnéticos 310 y/o los sensores de temperatura 312. La entrada del usuario también puede ser en lugar del control de circuito cerrado, es decir, la entrada del usuario puede usarse en lugar de la retroalimentación de los sensores 310 y/o 312. Es decir, en algunas modalidades, el control de circuito abierto de la rotación de la guía de ondas 372 con respecto al tubo de descarga de plasma 250A puede efectuarse a través de la entrada opcional del usuario.

20 La presente descripción proporciona un aplicador de plasma de microondas mejorado para la generación de gases reactivos para el procesamiento de materiales. El enfoque de la descripción proporciona una alta uniformidad de absorción de energía en el plasma, lo que reduce así el flujo de energía máxima a las paredes de la cámara de plasma y reduce la erosión de la superficie. El enfoque de la descripción también reduce la tensión termomecánica en la cámara de plasma y aumenta las capacidades de potencia del aplicador de plasma. La erosión de la superficie reducida de las paredes de la cámara y la tensión termomecánica reducida en la cámara de plasma da como resultado una mayor vida útil del aplicador. Se usa una topología de plasma de manera que un tubo dieléctrico recto con, por ejemplo, una sección transversal circular, elíptica o rectangular, pueda usarse como la cámara de plasma. Esto permite una selección más amplia de materiales dieléctricos para la cámara de descarga de plasma, tales como Al_2O_3 , Y_2O_3 , YAG, MgO y/o SiO_2 , en forma de cristal único o cerámica, para formar la cámara de plasma y para manejar varias químicas de plasma. El aplicador de plasma de la descripción puede funcionar con gases altamente reactivos, tales como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, flúor, cloro y mezclas de estos gases, con una respuesta rápida a los cambios en las tasas de flujo de gas. Los ejemplos de los gases incluyen H_2 , O_2 , N_2 , NF_3 , Cl_2 , HCl , NH_3 , CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , C_4F_8 , Cl_3F , N_2O y H_2O . El aplicador de plasma de la descripción puede operarse a una tasa de flujo de gas de 0,1 a 100 slm, un intervalo de presión de gas de 0,001 a 1000 torr, y una potencia de microondas de 1 a 20 kW. La mayor capacidad de potencia resulta en un mayor rendimiento del proceso. De acuerdo con la descripción, se minimiza la erosión de la superficie de la cámara de plasma y la contaminación química y de partículas asociada. La recombinación o desactivación de la superficie de los gases atómicos y moleculares excitados, tales como el H atómico, N, O, F, Cl y Br, se reducen para aumentar la producción de gas reactivo. De acuerdo con la descripción, se proporciona un aplicador de plasma de alta eficiencia energética que puede integrarse fácilmente en los sistemas de fabricación de semiconductores. Los procesos a los que puede aplicarse el aplicador de plasma de la descripción incluyen separación fotorresistente, grabado anisotrópico, deposición química de vapor, deposición o grabado de capa atómica, oxidación y/o nitración de la superficie, y limpieza de la superficie.

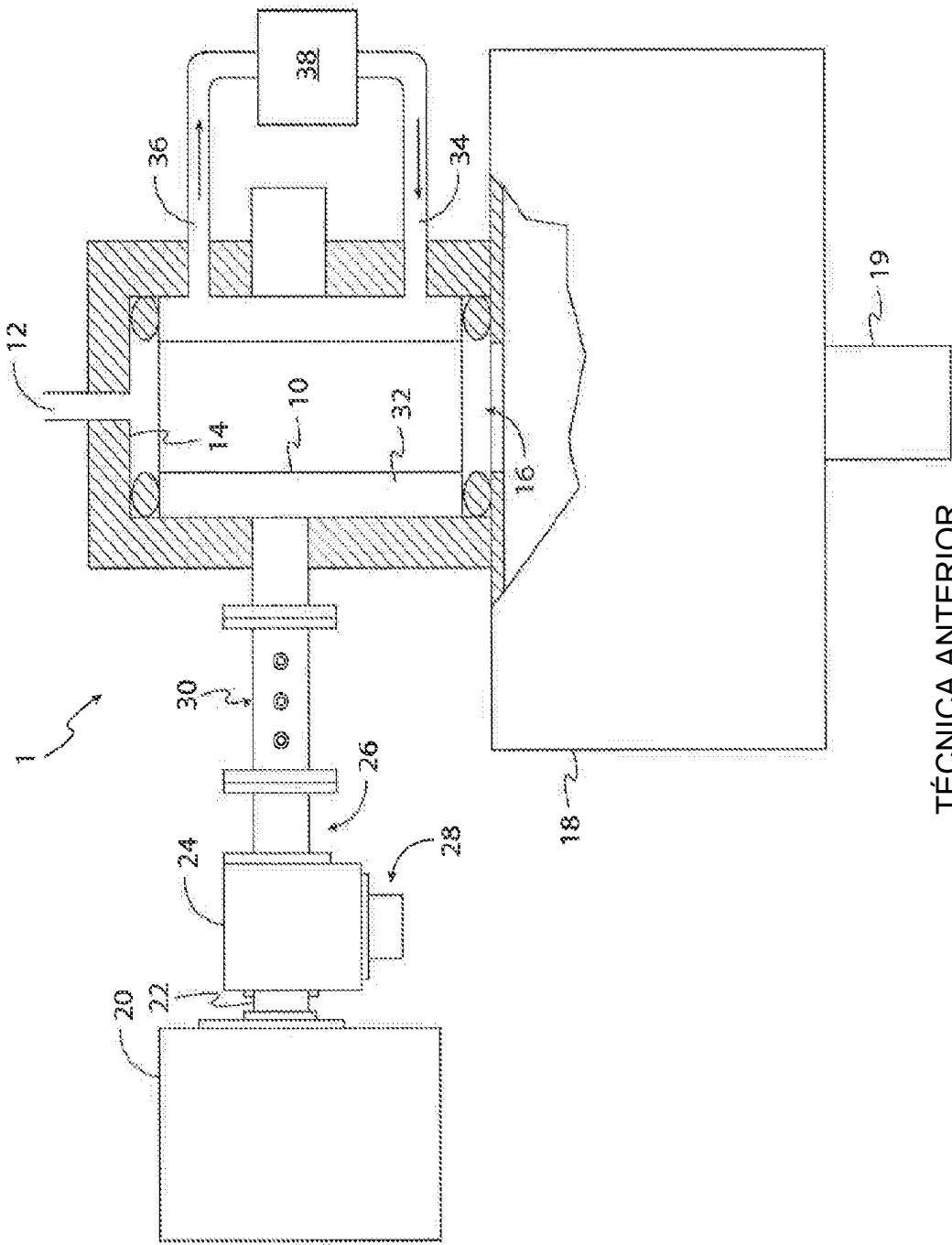
45 Si bien las modalidades ilustrativas se han mostrado y descrito particularmente en la presente descripción, los expertos en la técnica entenderán que pueden realizarse diversos cambios en la forma y los detalles sin apartarse del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (200,200A) para generar plasma, que comprende:
 un tubo de descarga de plasma (250A) sustancialmente transparente a la energía de microondas, el tubo de
 5 descarga de plasma que tiene un eje longitudinal (151); una bobina conductora (160) enrollada alrededor de
 una superficie externa del tubo de descarga de plasma, la bobina conductora que comprende un material
 eléctricamente conductor;
 una cavidad de microondas (252A) que rodea el tubo de descarga de plasma, una guía de ondas (272, 372)
 10 acoplada a la cavidad de microondas para guiar la energía de microondas hacia el tubo de descarga de plasma
 de manera que el plasma se genere en el tubo de descarga de plasma, la guía de ondas que tiene una sección
 transversal rectangular que define un lado más estrecho de la sección transversal rectangular y un lado más
 ancho de la sección transversal rectangular, un primer eje de sección transversal (170) de la sección transversal
 rectangular que es paralelo al lado más ancho de la sección transversal rectangular y un segundo eje de sección
 15 transversal (271) de la sección transversal rectangular que es paralelo al lado más estrecho de la sección
 transversal rectangular, la guía de ondas (272, 372) que se dispone de manera que el segundo eje de sección
 transversal (271), y por lo tanto, el campo eléctrico de microondas en uso forma un ángulo predeterminado con
 respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma de manera que, en uso, el campo eléctrico de
 20 microondas induce una corriente eléctrica en la bobina conductora, la corriente eléctrica que afecta la absorción
 de energía en el tubo de descarga de plasma, **caracterizado porque** el ángulo predeterminado puede
 seleccionarse de manera que la absorción de energía en el tubo de descarga de plasma es de acuerdo con un
 perfil predeterminado con respecto al eje longitudinal del tubo de descarga de plasma; y
 mediante un actuador (318A, 318B) para recibir una señal para ajustar el ángulo predeterminado mediante la
 rotación de la guía de ondas alrededor del eje longitudinal de la guía de ondas.
2. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el ángulo predeterminado es tal que el segundo eje de
 25 sección transversal (271) puede ajustarse para ser sustancialmente perpendicular al eje longitudinal (151) del
 tubo de descarga de plasma (250A).
3. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el ángulo predeterminado es tal que el segundo eje de
 30 sección transversal puede ajustarse entre un ángulo de 30° a 90° con respecto al eje longitudinal (151) del tubo
 de descarga de plasma (250A).
4. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el ángulo predeterminado es tal que el segundo eje de
 35 sección transversal (271) puede ajustarse entre un ángulo de 45° a 90° con respecto al eje longitudinal del tubo
 de descarga de plasma (250A).
5. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la guía de ondas (272, 372) se dispone de manera que
 el ángulo predeterminado se selecciona para aumentar la uniformidad de la absorción de energía con respecto
 40 al eje longitudinal (151) del tubo de descarga de plasma (150).
6. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la bobina conductora (160) comprende una pluralidad
 de bucles alrededor del tubo de descarga de plasma (250A), la pluralidad de bucles que define un patrón de
 separación entre los bucles adyacentes, el patrón de separación que puede seleccionarse en base a un efecto
 45 deseado predeterminado de la corriente inducida en la bobina conductora sobre la absorción de energía en el
 tubo de descarga de plasma.
7. El aparato de acuerdo con la reivindicación 6, en donde la bobina de enfriamiento conductora (160) se hace de
 tubos metálicos flexibles.
8. El aparato de acuerdo con la reivindicación 6, en donde se colocan formas dieléctricas o separadores en la
 50 bobina de enfriamiento conductora (160) para definir el patrón de separación.
9. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde:
 la bobina conductora (160) se acopla térmicamente al tubo de descarga de plasma (250A);
 55 la bobina conductora comprende un canal para permitir el flujo de un fluido refrigerante para eliminar el calor
 del tubo de descarga de plasma (250A).
10. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además un estrangulador de microondas (264)
 60 en cada uno de los dos extremos de la bobina conductora (160), los estranguladores de microondas para evitar
 sustancialmente la fuga de la energía de microondas desde el tubo de descarga de plasma (250A).
11. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la bobina conductora (160) se enrolla helicoidalmente
 alrededor de la superficie externa del tubo de descarga de plasma (250A).
- 65 12. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además al menos uno de un sensor de campo
 electromagnético (310) para generar una primera señal indicativa de la intensidad del campo electromagnético

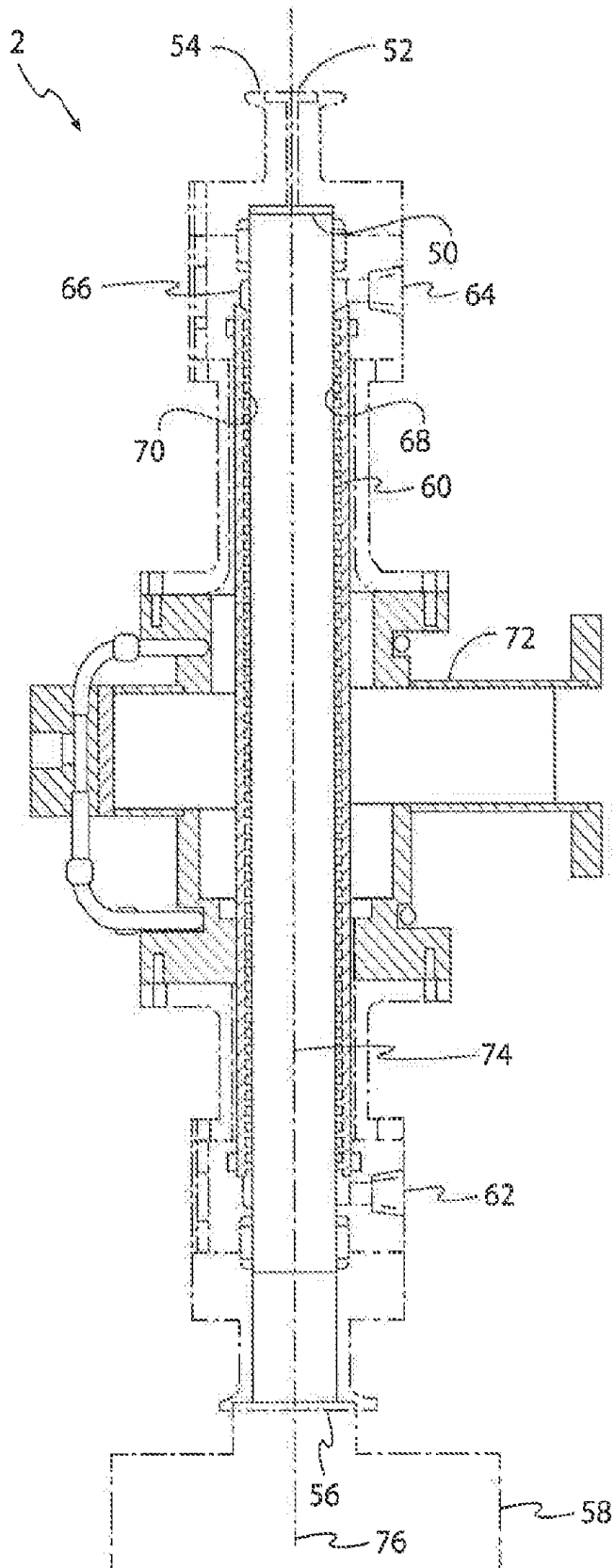
en el tubo de descarga de plasma (250A) o un sensor de temperatura (312) para generar una segunda señal indicativa de la temperatura en el tubo de descarga de plasma, y un controlador (314) para controlar el ángulo predeterminado en base a al menos una de las primera y segunda señales.

- 5 13. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el actuador se configura para girar la guía de ondas (272, 372) con respecto al tubo de descarga de plasma (250A) alrededor de un eje que es paralelo a un eje longitudinal de la guía de ondas para ajustar el ángulo predeterminado, en donde el aparato comprende además un controlador (314) para controlar el actuador para controlar el ángulo predeterminado.
- 10 14. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además un sensor (310) para monitorear la uniformidad axial del plasma en el tubo de descarga de plasma (250A).



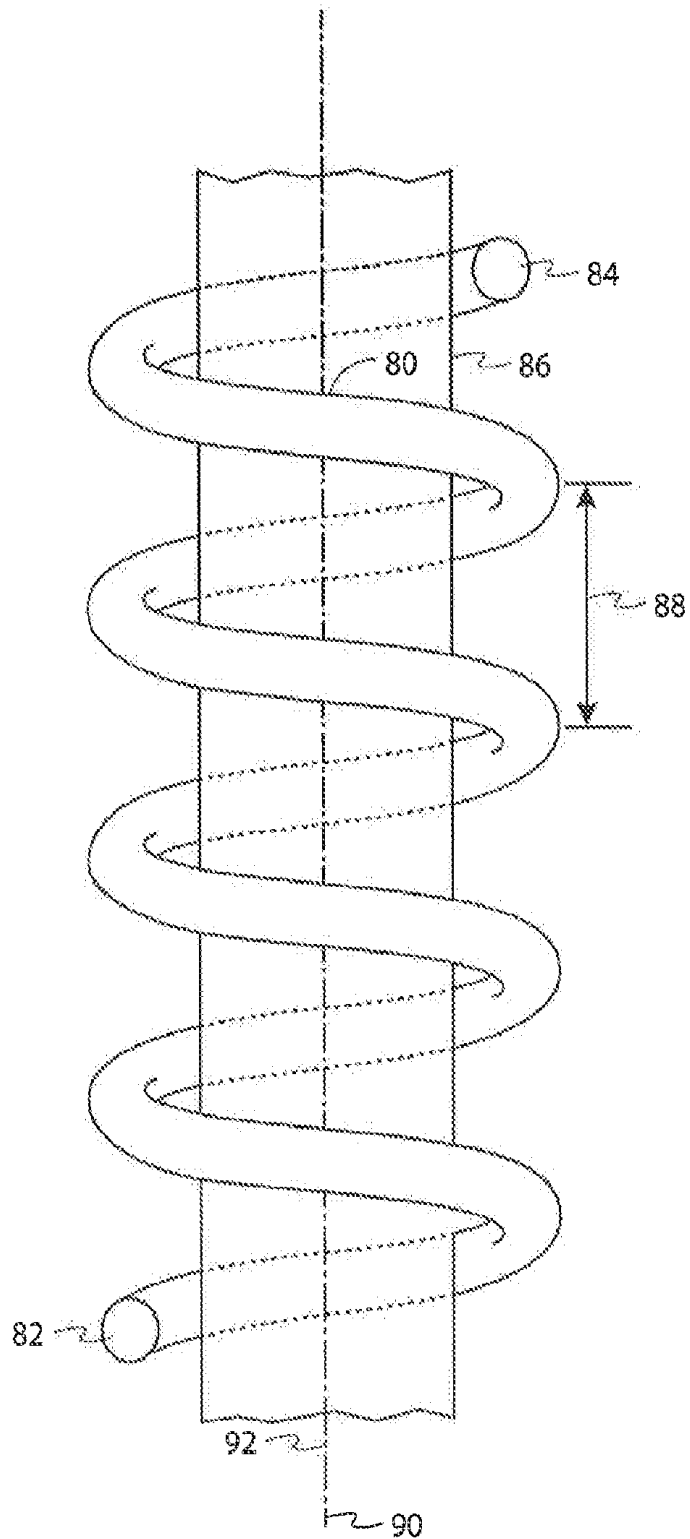
TÉCNICA ANTERIOR

Fig. 1



TÉCNICA ANTERIOR

Fig. 2



TÉCNICA ANTERIOR

Fig. 3

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

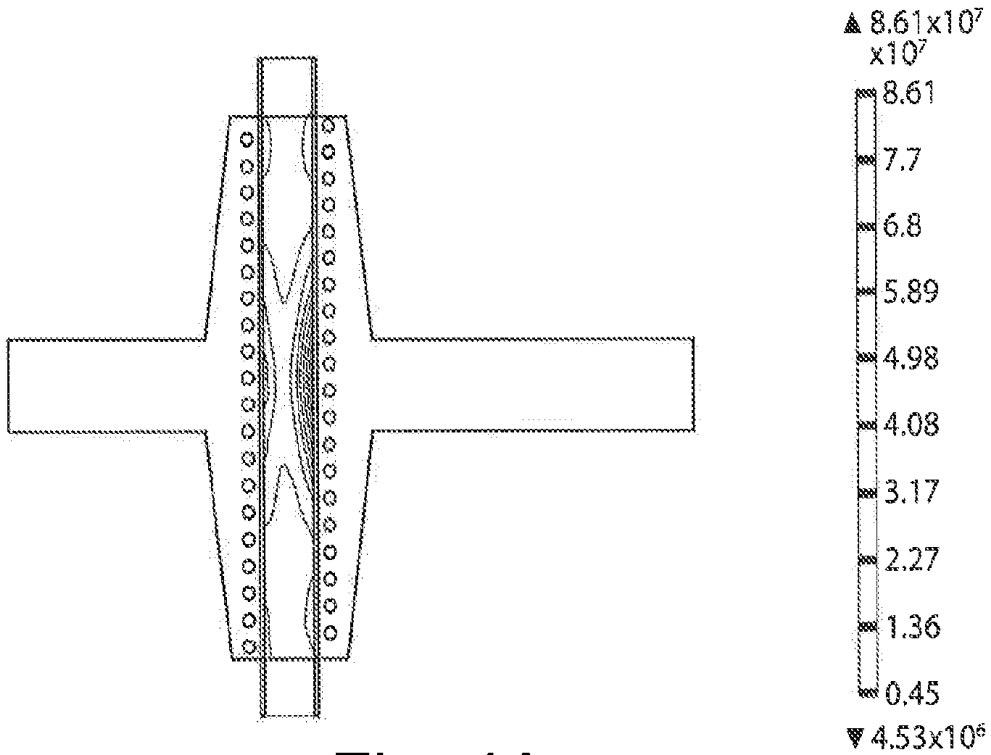


Fig. 4A

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

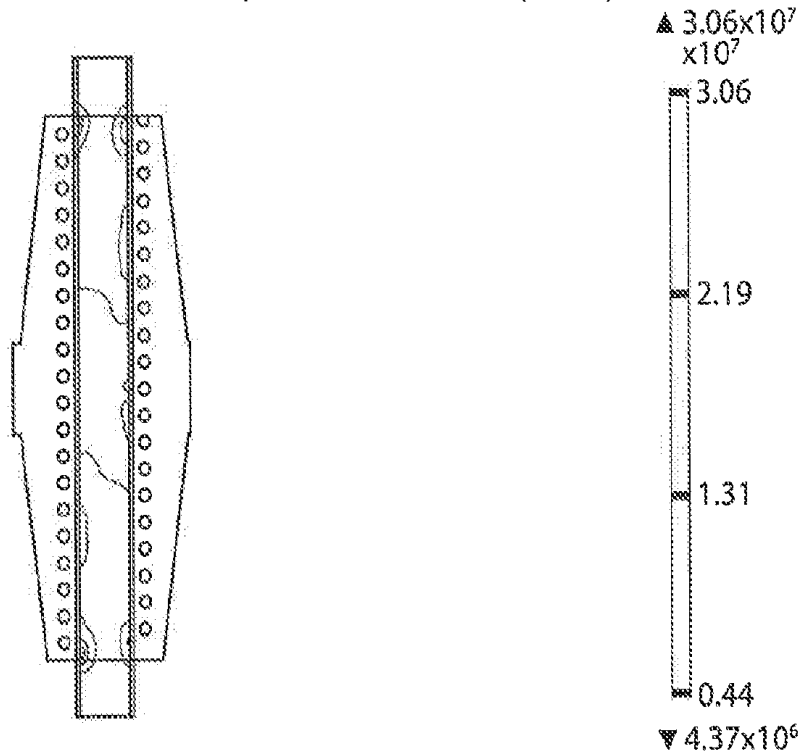


Fig. 4B

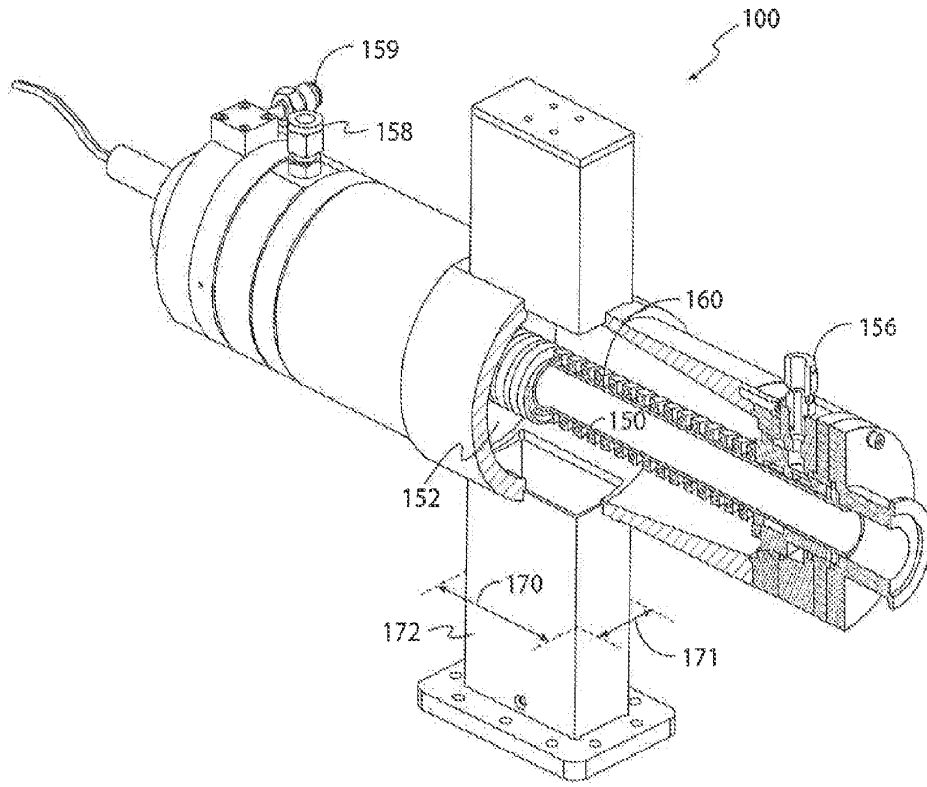


Fig. 5A

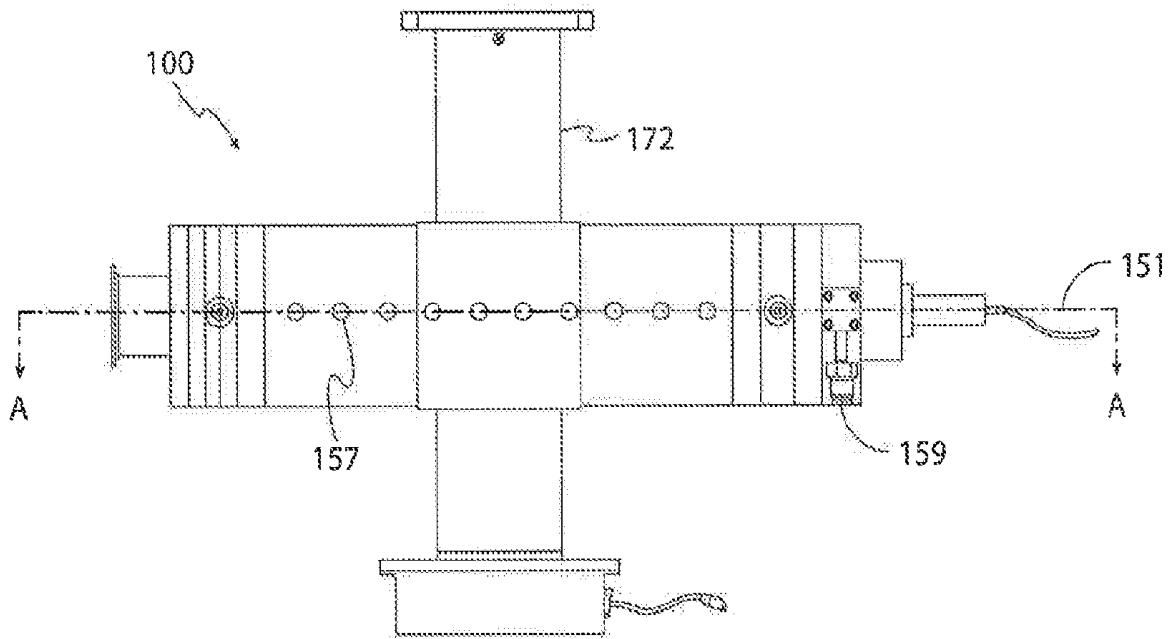


Fig. 5B

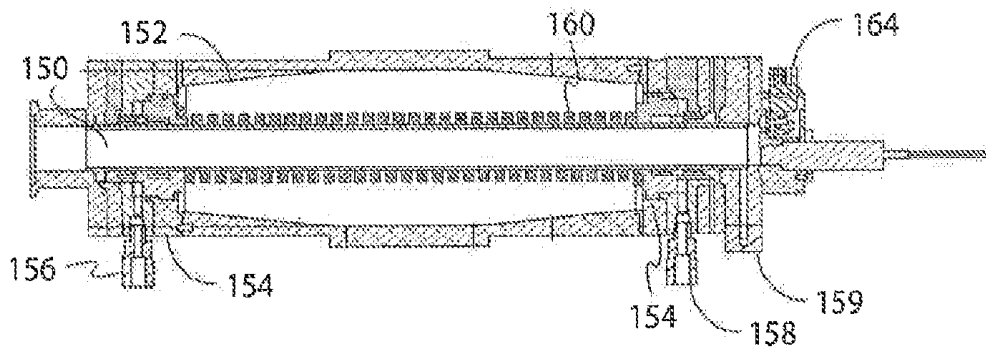


Fig. 5C

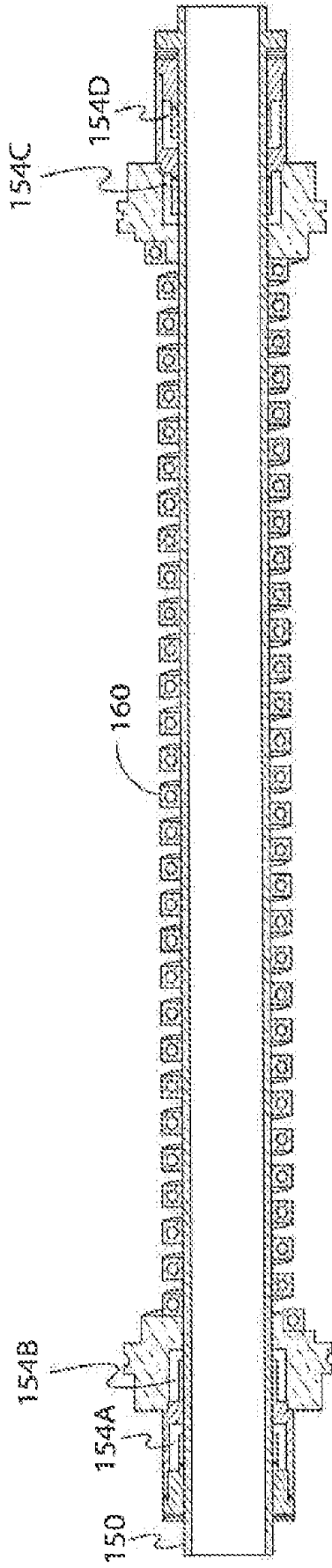


Fig. 5D

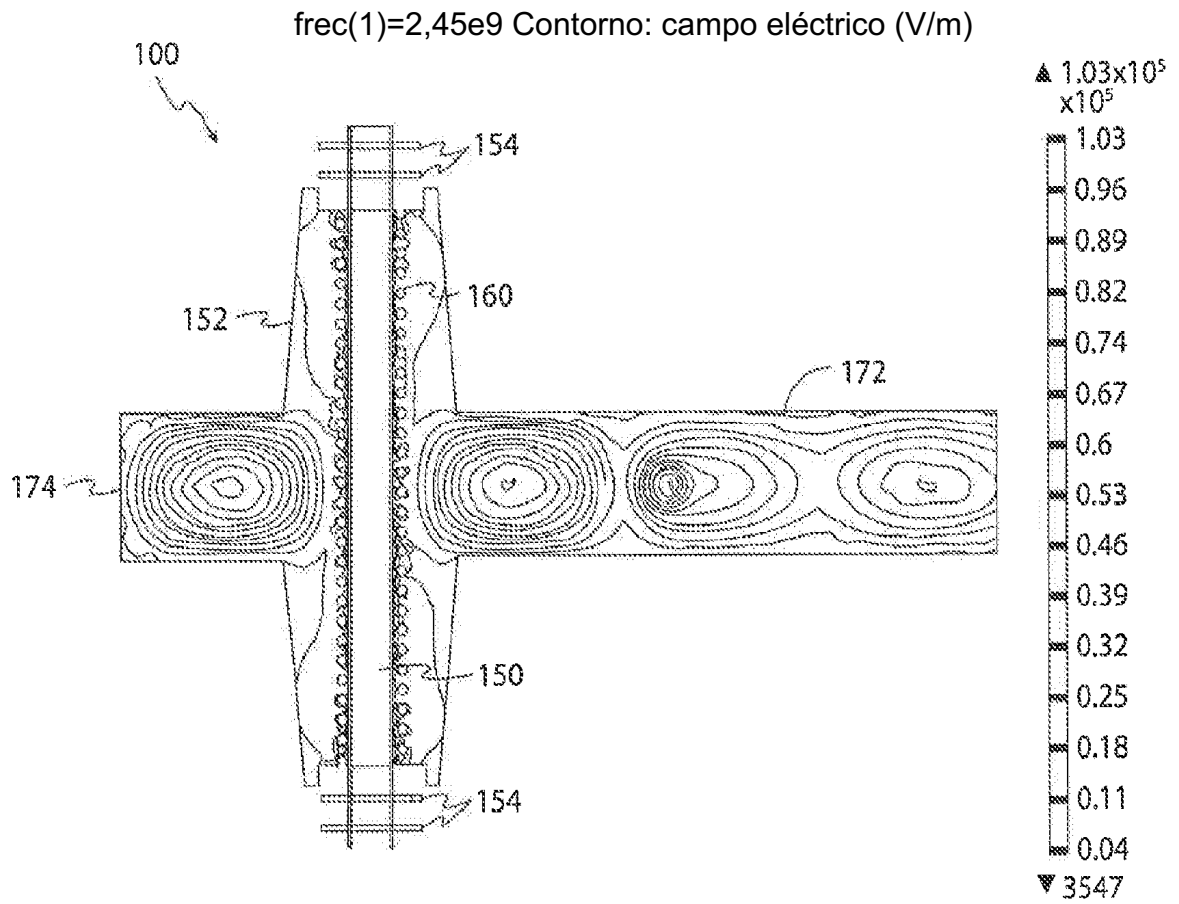


Fig. 6

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

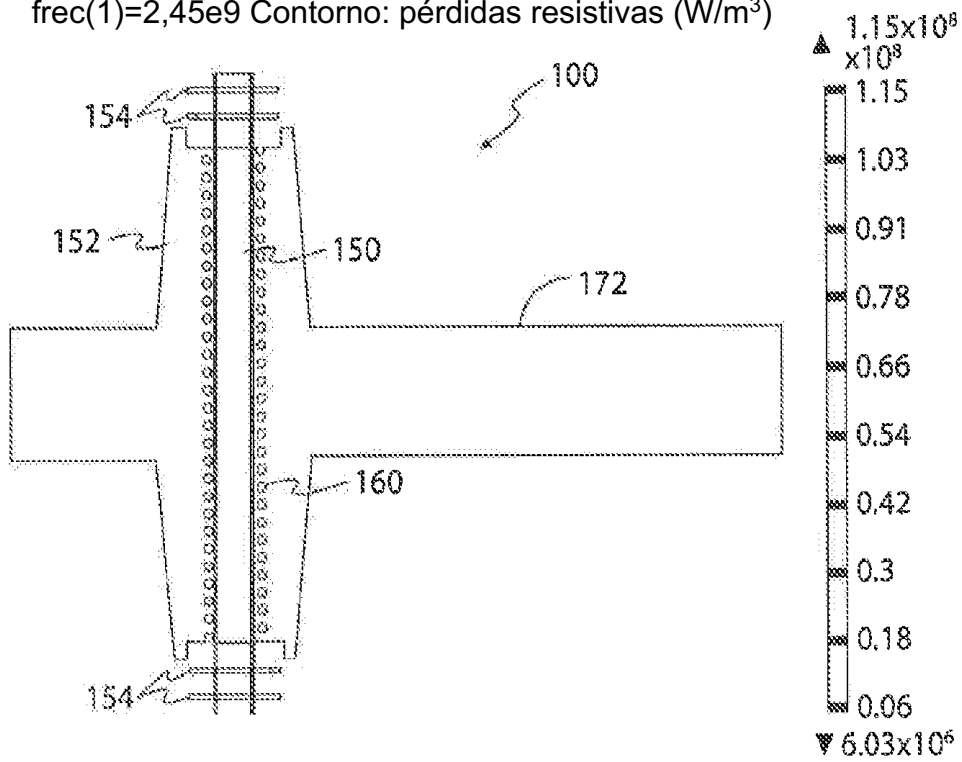


Fig. 7A

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

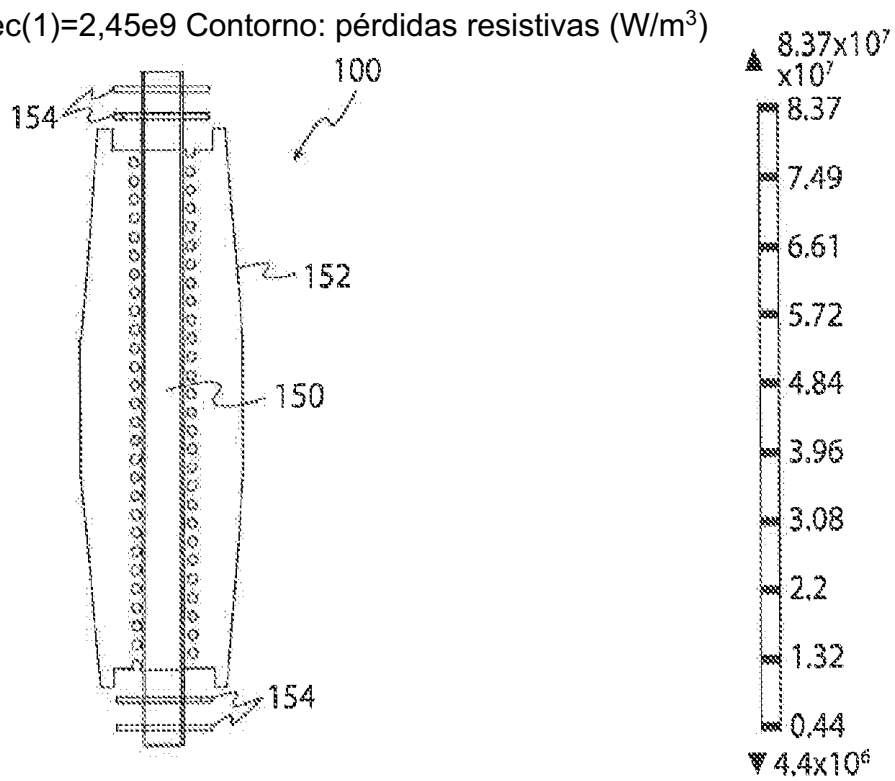


Fig. 7B

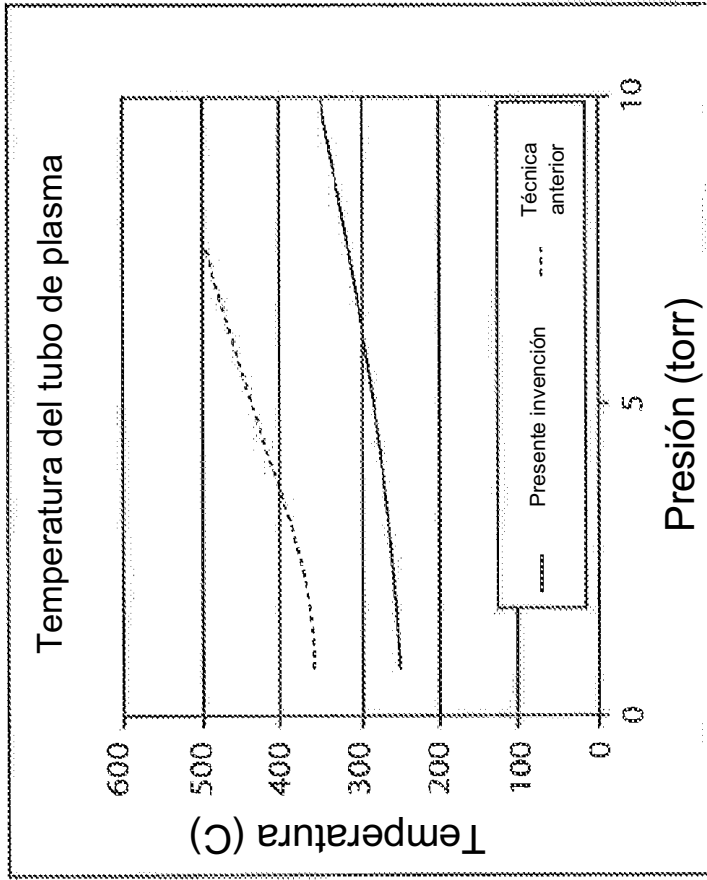


Fig. 8B

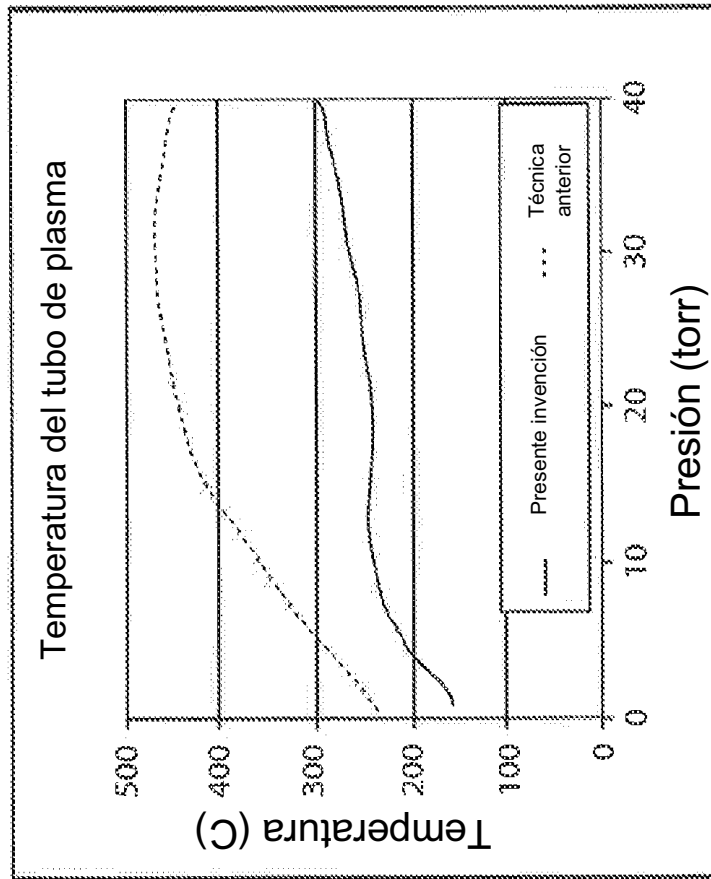


Fig. 8A

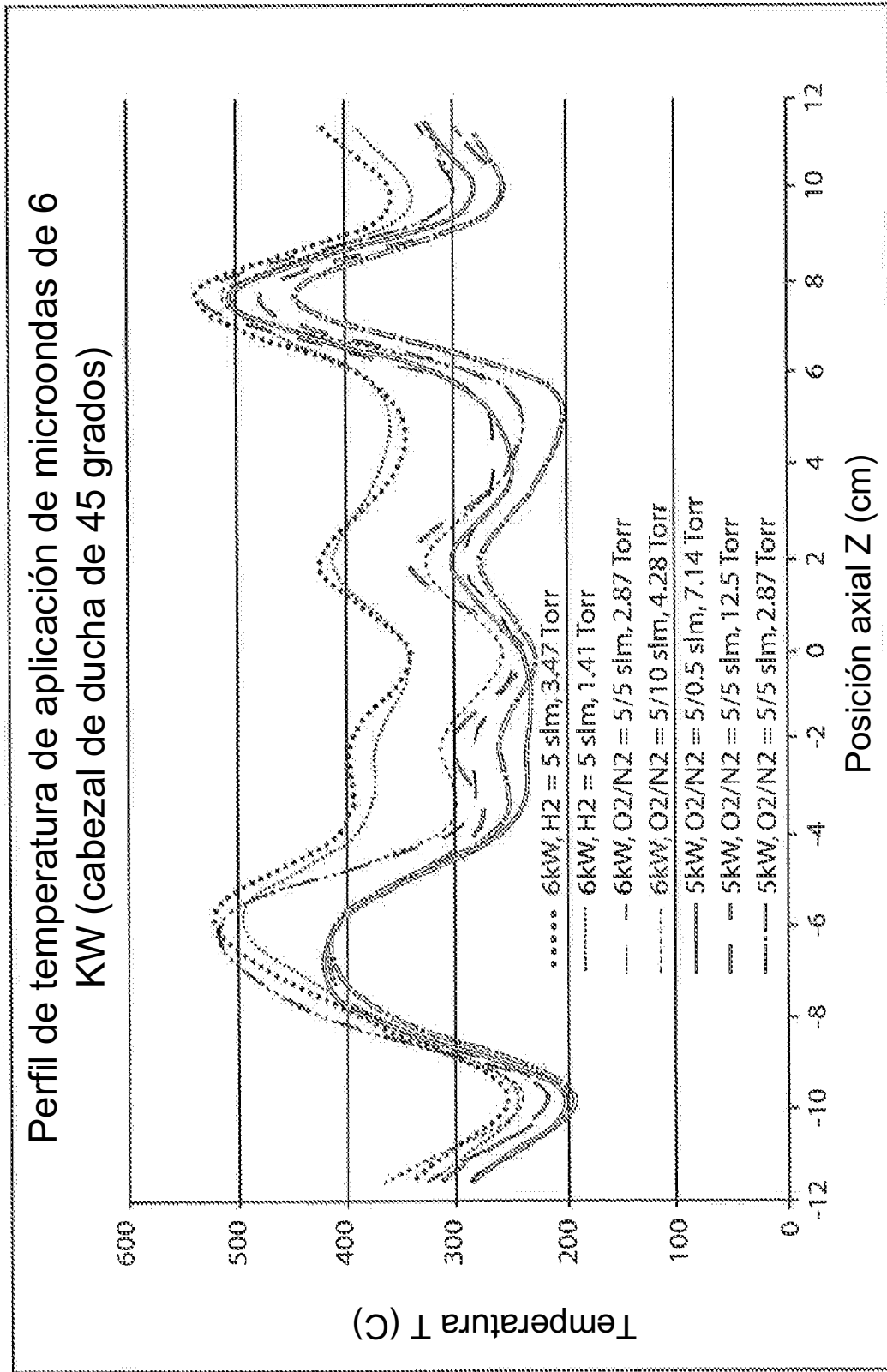


Fig. 9

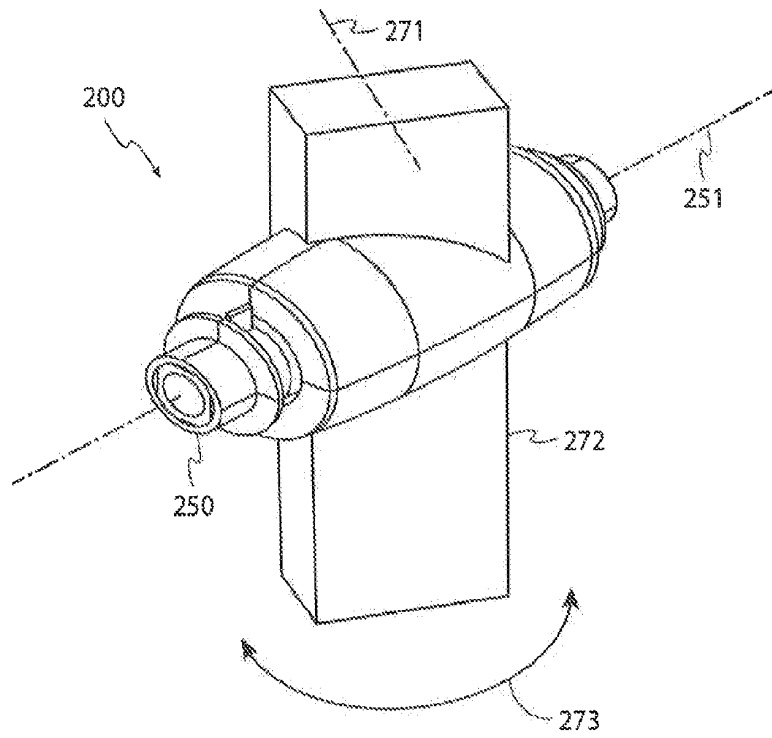


Fig. 10

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

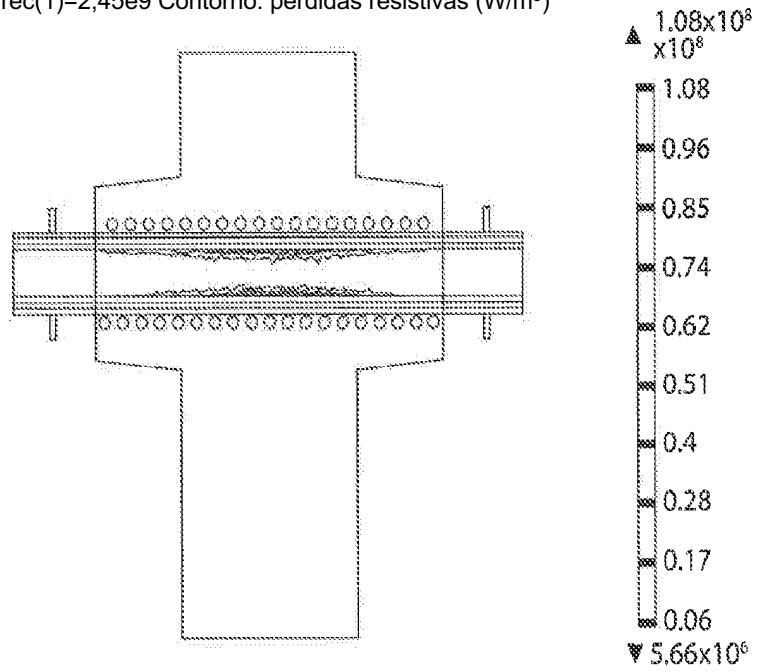


Fig. 11A

frec(1)=2,45e9 Contorno: pérdidas resistivas (W/m³)

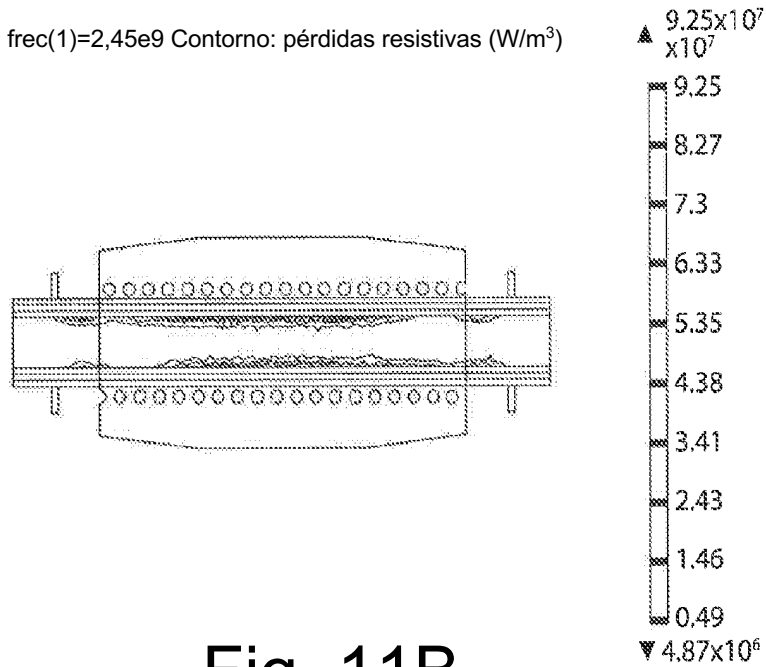


Fig. 11B

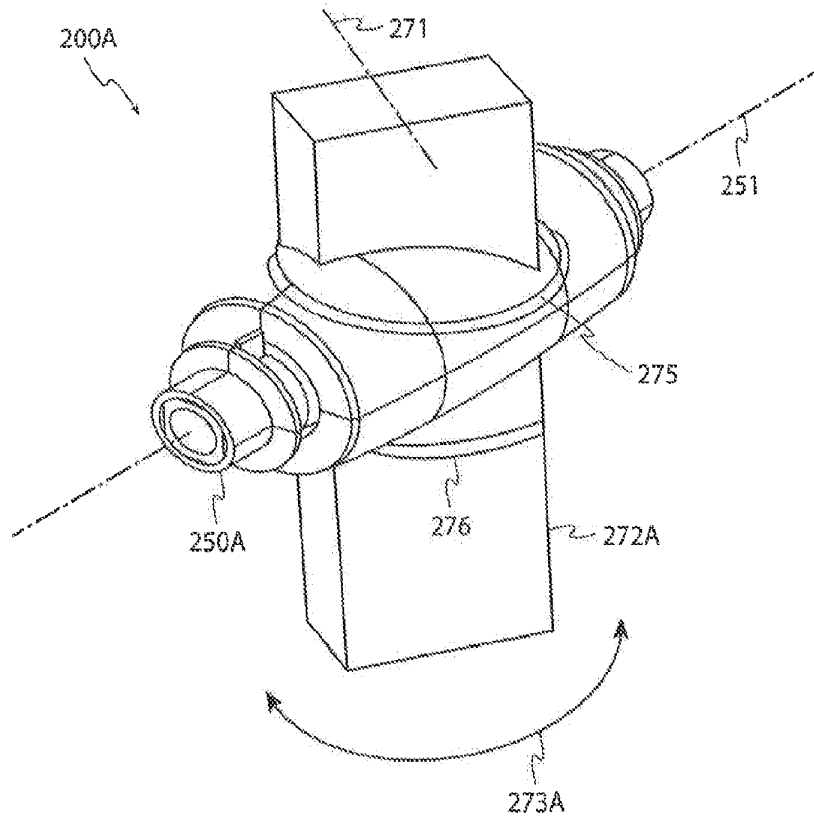


Fig. 12A

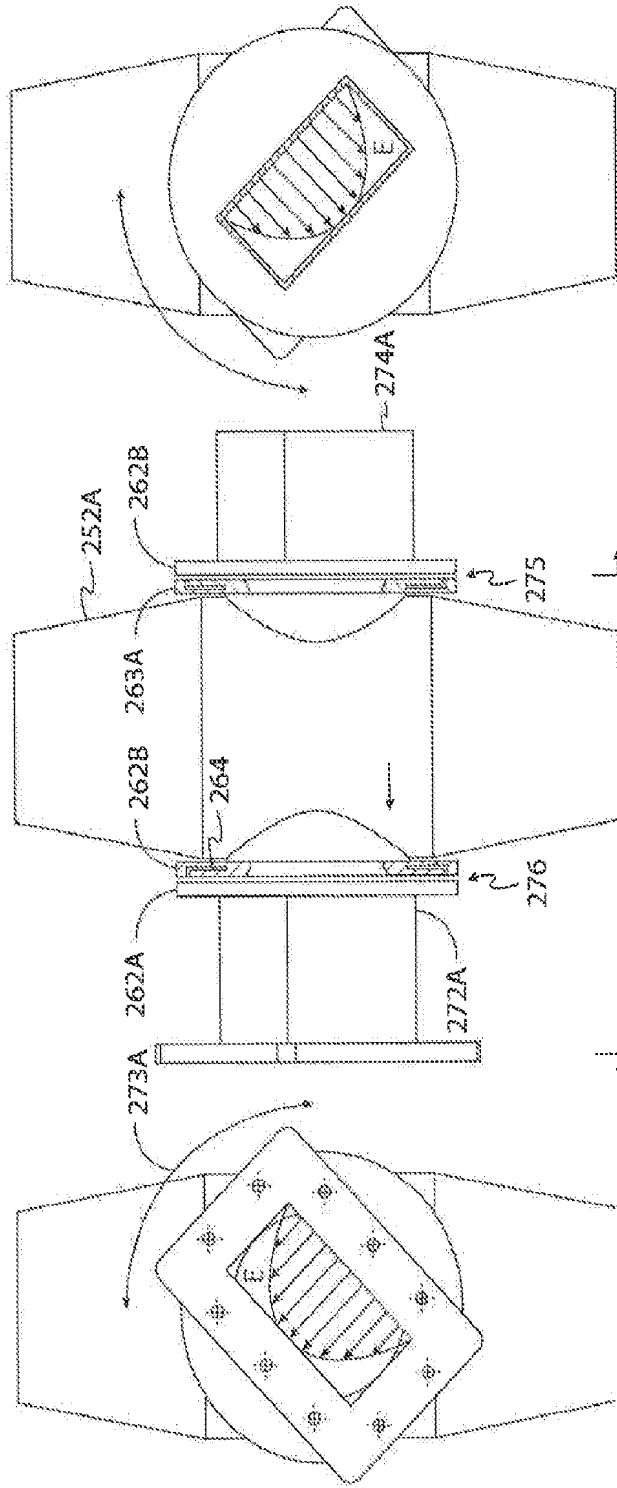


Fig. 12B

Fig. 12C

Fig. 12D

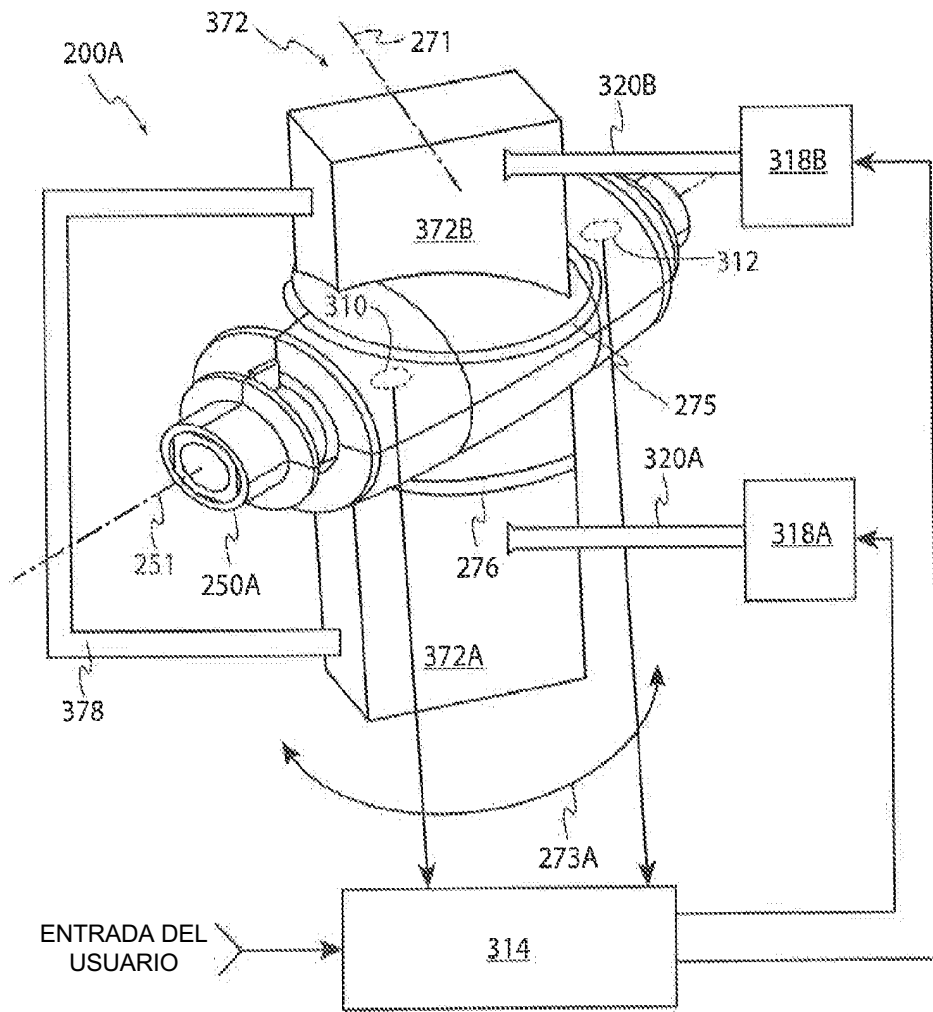


Fig. 13