

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 912 575**

51 Int. Cl.:

H01J 37/32

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.05.2019 PCT/NO2019/050103**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.11.2019 WO19216772**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.05.2019 E 19727111 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.02.2022 EP 3791421**

54 Título: **Aparato de reactor de depósito químico de vapor de plasma de microondas de área grande (LA MPCVD) y método para proporcionar el mismo**

30 Prioridad:

08.05.2018 NO 20180654

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

26.05.2022

73 Titular/es:

**VESTLANDETS INNOVASJONSSELSKAP AS
(100.0%)
Thormøhlensgate 51
5006 Bergen, NO**

72 Inventor/es:

ZALIECKAS, JUSTAS

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 912 575 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

Aparato de reactor de depósito químico de vapor de plasma de microondas de área grande (LA MPCVD) y método para proporcionar el mismo

Campo técnico

- 5 La presente invención se refiere a un aparato de reactor y un método para la deposición química de vapor de plasma de microondas MPCVD.

Antecedentes de la técnica

- 10 Los reactores conocidos de deposición química de vapor de plasma de microondas, MPCVD, emplean una fuente de energía de microondas que se acopla y suministra energía de microondas al interior de una cámara de reactor MPCVD. La cámara de reactor MPCVD, que forma una cavidad resonante para la energía de microondas recibida, se diseña para dar forma al campo eléctrico de la energía electromagnética dentro de la cámara con una intensidad de campo en la vecindad de un sustrato lo suficientemente alta como para formar un plasma a alta temperatura que promueve una reacción que forma un vapor de material que se deposita en el sustrato cercano.

- 15 En una disposición de reactor MPCVD conocida para la deposición de material de diamante, las microondas generadas por la fuente de energía de microondas entran típicamente a la cámara de reactor a través de una guía de ondas tradicional dispuesta entre la fuente de energía de radiación de microondas y la cámara de reactor, para acoplar una salida de la fuente de energía de radiación de microondas a través de un acoplador de guía de ondas tradicional a través de una abertura en una pared de la cámara de reactor. Las ondas que han entrado en el espacio de reactor son, por el diseño y la forma de la cámara, desviadas por las paredes de la cámara de reactor y se propagan aún más por reflexión desde las paredes internas de la cavidad, de modo que se concentran para formar el plasma en un volumen relativamente pequeño de la atmósfera de la cámara de reactor inmediatamente por encima de un soporte de sustrato adecuado ubicado dentro de la cámara de reacción. La reacción de los constituyentes de la atmósfera tiene lugar dentro de la región de plasma relativamente pequeña en la que el fuerte campo eléctrico localizado de la energía de microondas dentro de la cámara ioniza los gases de trabajo para formar material de diamante, y la deposición del material de diamante tiene lugar en un sustrato adecuado que se apoya en el soporte de sustrato. El soporte de sustrato se dispone típicamente para moverse verticalmente dentro de la cámara, lo que también permite ajustar las propiedades resonantes de la cavidad resonante. Esto puede ser beneficioso para el plasma de mayor densidad que tiende a reflejar parte de la radiación entrante, lo que a su vez afecta las propiedades resonantes de la cavidad.

- 30 Algunos documentos con enseñanzas relacionadas con la energía de microondas y los reactores MPCVD son:

- A. Kromka et al., Linear antenna microwave plasma CVD deposition of diamond films over large areas, volumen 86, número 6, 27 de enero de 2012, páginas 776-779;
- S. Liao et al., Synthesis, Simulation and Experiment of Unequally Spaced Resonant Slotted-Waveguide Antenna Arrays Based on the Infinite Wavelength Propagation Property of Composite Right/Left Handed Waveguide, IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Volumen: 60, Edición: 7, julio de 2012);
- J. Kim et al., Large-area surface wave plasmas using microwave multi-slot antennas for nanocrystalline diamond film deposition, Plasma Sources Science and Technology, Volumen 19, Número 1;
- Microwave engineering of plasma-assisted CVD reactors for diamond deposition, Journal of Physics Condensed Matter. 09/2009; 21(36):364202. DOI:
- 40 - 10.1088/0953-8984/21/36/364202;
- US2005/0160986A1, J.-H. Hur et. al., 28/07/2005;
- L. Xiao Jing et. al., IC3ME 2015 (páginas 2170-2176);
- US5230740A, J.E. Pinneo; 27/07/1993;
- US2006/0153994A1, A.H. Gicquel et. al., 13/07/2006;
- 45 - CN 103526187A, Wuhan Inst. Technology, 22/01/2014.
- Y. A. Lebedev. Microwave discharges at low pressures and peculiarities of the processes in strongly non-uniform plasma. a. Plasma Sources Sci. Technol. 24 053001, 2015, revisa los métodos de generación de plasma de microondas a presiones desde 10-2 aproximadamente hasta 30 kPa con microondas de longitud de onda centimétrica-milimétrica sobre la base de publicaciones científicas desde 1950 hasta la actualidad.
- 50 - El documento US 2005/000446 A1 se refiere a un aparato de procesamiento de plasma que incluye al menos

una fuente de ondas electromagnéticas para generar una onda electromagnética, una parte de guía de ondas de distribución de ondas electromagnéticas para distribuir la onda electromagnética generada desde la fuente de ondas electromagnéticas, una pluralidad de guías de ondas, cada una acoplada con la parte de guía de ondas de distribución de ondas electromagnéticas, estando dispuestas las guías de ondas en el mismo plano, una pluralidad de ranuras proporcionadas en cada una de las guías de ondas, al menos una ventana de radiación de ondas electromagnéticas proporcionada para mirar a cada ranura, y un recipiente de vacío en el que la onda electromagnética radiada desde la ventana de radiación de ondas electromagnéticas genera un plasma.

- La patente europea EP 0702393 A2 divulga un aparato de procesamiento de plasma que incluye una cámara de plasma que tiene una ventana estrecha y una guía de ondas rectangular para acoplarse con la cámara de plasma, la guía de ondas rectangular tiene una ranura larga dispuesta en un plano E de la misma para oponerse a la ventana estrecha de la cámara de plasma y extenderse a lo largo de la dirección del eje de guía de ondas de la guía de ondas rectangular. Además, se proporcionan al menos dos ranuras largas dispuestas en al menos una guía de ondas rectangular.

- El documento KR 20170101452 A se refiere a un dispositivo de plasma de ondas superficiales, que comprende: una primera guía de ondas que incluye una pluralidad de antenas de ranura conectadas a una primera fuente de energía de microondas en un extremo; una segunda guía de ondas que incluye una pluralidad de antenas de ranura, dispuestas en paralelo con la primera guía de ondas que tiene una segunda fuente de energía de microondas conectada a un extremo opuesto de la primera guía de ondas; una placa dieléctrica para introducir microondas radiadas desde las antenas de ranura en una cámara para generar plasma de ondas superficiales; y una parte de suministro de gas para suministrar gas a la cámara.

Los reactores MPCVD anteriores tienen un área de deposición limitada y, por lo tanto, es necesario un aparato de reactor de deposición química de vapor de plasma de área grande y eficiente energéticamente.

El documento US 2012/177542 A1 se refiere a un reactor CVD de plasma de microondas de área grande en donde se usa una pluralidad de unidades de generación de plasma de microondas adyacentes para tratar un sustrato de área grande. Cada una de dichas unidades comprende una guía de ondas conectada a una fuente de microondas en un extremo y desembocando en una cámara de reacción de plasma en el otro extremo. Las microondas se acoplan desde dichas guías de ondas a dicha cámara a través de ventanas dieléctricas correspondientes.

Compendio de la invención

De acuerdo con la invención, se propone un nuevo diseño de aparato de reactor de deposición química de vapor de plasma de microondas de área grande, LA MPCVD.

La presente invención proporciona un aparato de reactor LA MPCVD que comprende una sección de guía de ondas CLRH, derecha/izquierda, según la reivindicación independiente 1.

La presente invención también es un método para proporcionar una deposición química de vapor de plasma de área grande en una cámara de reactor de acuerdo con la reivindicación independiente 16.

El LAMPCVD y el método de la invención permiten la deposición de películas uniformes sobre un área grande en diferentes sustratos. La invención está definida por las reivindicaciones.

Un ejemplo de una aplicación para el reactor según la invención es la posibilidad de escalar la cavidad de reactor para aumentar el tamaño de la región de plasma generado, permitiendo, p. ej. recubrir con diamante obleas de tamaño estándar.

Descripción de los dibujos

A continuación, se describirán realizaciones de la invención con mayor detalle con referencia a las siguientes figuras para ejemplificar sus principios, funcionamiento y ventajas. Obsérvese que para una mejor ilustración de las características de microondas, varios de los dibujos ilustran la cavidad, es decir, el espacio interno de los elementos y no los elementos físicos en sí. Esto facilita la visualización de las propias cavidades y la distribución del campo eléctrico dentro de las cavidades.

La Figura 1 ilustra en una vista en perspectiva una cavidad de una guía de ondas CRLH compuesta derecha/izquierda, según una realización de la invención.

La Figura 2 ilustra la densidad de corriente en la superficie superior de la cavidad de la Figura 1.

La Figura 3 es otro dibujo de vista superior de acoplador que ilustra las cavidades y el principio de una configuración típica y una distribución de densidad de corriente homogénea de un segundo ejemplo de un aparato de reactor LA MPCVD según la invención que emplea una pluralidad de guías de ondas CRLH de extremo cortocircuitado dispuestas una al lado de otra con ranuras para acoplar energía de microondas de las guías de ondas. Cabe señalar que solo se ilustran las cavidades de las guías de ondas CRLH y no el dispositivo físico;

La Figura 4A ilustra en un modelo CAD 3D una cavidad resonante según una realización de la invención conectada a un conjunto de guías de ondas CRLH como se ilustra en la Figura 3. Aquí solo se muestran las cavidades.

La Figura 4B ilustra distribuciones de campo eléctrico en los planos -yz y -xz de la cavidad resonante ilustrada en la Figura 4A. Como puede verse, el campo eléctrico es alto en un gran volumen de la cavidad resonante.

5 La Figura 5 ilustra la distribución de campo magnético en la dirección yz. Aquí las flechas indican tanto la dirección como la intensidad de campo. Las flechas más grandes y sólidas indican una mayor intensidad de campo que las flechas pequeñas y delgadas.

10 La Figura 6 ilustra secciones transversales del reactor y la distribución de campo eléctrico en planos xy, xz e yz para la realización de la Figura 4A. Las líneas rojas continuas indican las paredes de la cámara de deposición, el contorno negro punteado representa la ventana de cuarzo, mientras que el contorno negro discontinuo muestra el área de deposición.

15 La Figura 7A ilustra un modelo CAD en 3D de una cavidad resonante según la invención conectada a un conjunto de guías de ondas CRLH como se ilustra en la Figura 3. Obsérvese que aquí solo se muestran las cavidades. Aquí, la cavidad de reactor se divide en dos volúmenes principales, correspondiendo las subcámaras primera y segunda en este ejemplo a los volúmenes inferior y superior, respectivamente.

La Figura 7B es un dibujo en corte de una vista en perspectiva que proporciona una ilustración tridimensional del campo eléctrico dentro de un aparato de reactor LA MPCVD de acuerdo con la realización de la invención ilustrada en la Figura 7A;

20 La Figura 8 ilustra la distribución del campo magnético en la dirección yz para la realización de la cavidad resonante de la Figura 7A. Aquí las flechas indican tanto la dirección como la intensidad de campo. Las flechas más grandes y sólidas indican una mayor intensidad de campo que las flechas pequeñas y delgadas.

La Figura 9 ilustra en una vista en sección transversal la distribución del campo eléctrico en el plano yz para la realización de la Figura 7A. El contorno negro punteado representa las posibles ubicaciones de las ventanas de cuarzo.

25 La Figura 10A es un dibujo de vista en perspectiva que ilustra el campo eléctrico en la cavidad en un instante dado de un aparato de reactor LA MPCVD de acuerdo con la realización ilustrada en la Figura 7, que comprende cuatro dispositivos de guía de ondas CRLH de extremo cortocircuitado dispuestos uno al lado de otro y una disposición de líneas de guía de ondas y divisores, como uniones en T, dispuestas para alimentar energía de microondas a todos los dispositivos de guía de ondas CRLH desde una fuente de energía de microondas común. También se muestran ventanas de cuarzo, dispuestas horizontalmente;

30 La Figura 10B es una vista en perspectiva que ilustra una implementación física de la realización de la Figura 10A. En este caso, el reactor LA MPCVD comprende cuatro dispositivos de guía de ondas CRLH de extremo cortocircuitado dispuestos uno al lado de otro debajo de la cámara de vacío y una disposición de líneas de guía de ondas y divisores, como uniones en T, dispuestas para alimentar energía de microondas a todos los dispositivos de guía de ondas CRLH desde una fuente de energía de microondas común para conectarse al orificio de entrada rectangular en la parte inferior del dibujo. Se puede usar una unidad de adaptación de impedancia, como un sintonizador de 3 espigas, entre la fuente de energía y el puerto de entrada;

40 La Figura 11 ilustra en una sección transversal la distribución del campo eléctrico en el plano xz. El contorno discontinuo indica la región de plasma. La distribución podría representar la distribución de la realización ilustrada en la Figura 4A, o la distribución de la realización de la Figura 7A, segunda subcámara, volumen superior de la cámara de reactor.

La Figura 12A es una vista esquemática en sección transversal de un detalle del reactor según la realización ilustrada en la Figura 7A.

45 La Figura 12B es una vista en perspectiva que ilustra una implementación física de la mitad superior de la cámara de vacío de reactor mostrada en la Figura 10B. En esta vista, se ha retirado la placa delantera para ilustrar el detalle del reactor mostrado en la Figura 12A anterior.

La Figura 13A es una vista en perspectiva de una cavidad de celda unitaria de la guía de ondas CRLH.

La Figura 13B es un diagrama de dispersión que representa un cambio de fase por celda unitaria con una frecuencia de 2,45 GHz.

50 La Figura 13C ilustra las medidas de la cavidad de la celda unitaria en mm según una realización de la invención cuando la frecuencia es de 2,45 GHz.

La Figura 13D ilustra las medidas y la disposición de las ranuras de las guías de ondas CRLH según una realización de la invención. En esta realización, las ranuras se disponen a 45 grados con respecto a las direcciones zyx de la guía de ondas y tienen una longitud de 40 mm y una anchura de 8 mm.

La Figura 14A ilustra cómo se pueden usar las espigas para ajustar las dimensiones de la celda unitaria. Recuérdese que la celda unitaria ilustrada es una cavidad, mientras que las espigas representan elementos físicos.

La Figura 14B ilustra en una vista en sección transversal con una parte superior recortada, cómo se pueden introducir espigas en la cavidad para alterar las dimensiones de las celdas unitarias. Aquí se muestra una implementación física de la guía de ondas CRLH según una invención. Las cavidades son las celdas unitarias dispuestas secuencialmente dispuestas dentro de la guía de ondas.

La Figura 14C ilustra un detalle de la Figura 14B.

La Figura 15 ilustra en un diagrama de bloques una realización de un método para adaptar el reactor a diferentes frecuencias de trabajo que se desvían de una frecuencia nominal para la que está diseñado el reactor.

En los dibujos, las direcciones x e y se definen como perpendiculares a las guías de ondas CLRH, mientras que la dirección z está en la dirección longitudinal de la guía de ondas. Además, la dirección y es la dirección desde la guía de ondas al reactor. Las direcciones se indican en la mayoría de los dibujos. La definición de las direcciones se da solo para ilustración y se podrían haber usado otras definiciones en su lugar.

Las figuras tal como se presentan se presentan en color. Esto mejora la ilustración de la distribución de corriente en el reactor y sus elementos, como p. ej. la distribución de corriente en la sección de guía de ondas CLRH. El color rojo indica la densidad de corriente más alta, mientras que el azul es la densidad de corriente más baja. Entre el rojo y el azul hay áreas anaranjadas, amarillas y verdes con densidades de corriente decrecientes. El color rojo y, por lo tanto, la densidad de corriente más alta se puede ver, p. ej. en el centro, a lo largo de la sección CLRH de la Figura 2 y la Figura 3, en el medio de la cámara superior en la Figura 7B y la Figura 9B, así como en el medio de la Figura 11.

Descripción detallada de la invención

En lo que sigue, la presente invención se denomina Reactor de deposición química de vapor de plasma de microondas de área grande, y se identifica en este documento por el acrónimo LA MPCVD. En general, el LA MPCVD inventivo proporciona en un primer aspecto un nuevo acoplamiento de energía de microondas en una cámara de deposición de área grande. Como se ilustra en la Figura 3, el acoplador de energía de microondas se basa en al menos una sección de una propiedad de longitud de onda infinita de una guía de ondas CRLH compuesta de mano derecha/izquierda. El dispositivo de guía de ondas CRLH puede ser una sección cortocircuitada de una guía de ondas CRLH, constituida por una cadena de celdas unitarias de guía de ondas. Cada celda unitaria en una cadena se diseña para proporcionar un cambio de fase para bandas de paso de izquierda, LH, y derecha, RH, con dispersión cero para una frecuencia que coincida con la frecuencia de trabajo de la energía de microondas. Normalmente, en una realización práctica, el generador de energía de microondas puede funcionar a una frecuencia de 2,45 GHz. En aplicación de esta propiedad de la guía de ondas CRLH operada en su "frecuencia de propagación de longitud de onda infinita", la corriente eléctrica en diferentes partes de una pared de la guía de ondas parece en cualquier momento ser uniforme o "coherente", sin variación aparente a lo largo de la dirección de propagación de microondas, longitudinalmente en la guía de ondas como se indica por el eje marcado como "z", y extendiéndose sustancialmente por toda la longitud de la sección en cortocircuito de la guía de ondas CRLH comprendida en el dispositivo de guía de ondas CRLH de la invención.

Para acoplar la energía electromagnética de microondas "coherente" aparentemente uniforme o de "longitud de onda infinita" fuera de la guía de ondas y dentro de la cámara de reactor LA MPCVD, el dispositivo de guía de ondas CRLH de la invención se provee de una o más ranuras orientadas y dimensionadas apropiadamente en una pared de la guía de ondas CRLH que transporta la corriente eléctrica "coherente" uniformemente distribuida creada por la energía de microondas que se propaga en la guía de ondas.

De esta manera, todos los elementos de ranura a lo largo de la pared de guía de ondas CRLH en cortocircuito pueden excitarse para generar energía de microondas que en el tiempo está en fase o en antifase.

Para extender el área del campo eléctrico uniforme también en una dirección que es diferente de la dirección de propagación de la energía de microondas en la guía de ondas CRLH de un solo dispositivo de guía de ondas CRLH de la invención, como por ejemplo en la dirección indicada por el eje etiquetado como "y", varios dispositivos de guía de ondas CRLH pueden colocarse en una configuración de lado a lado y operarse simultáneamente para establecer un campo eléctrico de energía de microondas uniforme de área grande, configurando una región de plasma uniforme de área grande, dentro de la cámara de reacción.

En una primera realización, la invención es, por lo tanto, un aparato de reactor LA MPCVD (1). El aparato de reactor (1) comprende una cámara de reactor (2) adaptada para proporcionar una región de plasma en el interior de la cámara de reactor mediante energía electromagnética a una primera frecuencia. Comprende además una sección de guía de ondas CRLH (3) adaptada para operar con una longitud de onda infinita en la primera frecuencia y que tiene en una pared unos medios acopladores (4) dispuesto para acoplar energía electromagnética desde un interior de la sección de guía de ondas CRLH (3) al interior de la cámara de reactor (2). Dos aparatos de reactor diferentes se ilustran indirectamente en las Figuras 4A y 7A por sus cavidades internas. La Figura 10B ilustra un aparato de reactor (1) con la cavidad interna de la Figura 7A. En la Figura 1 se ilustra una sección de guía de ondas CRLH que puede utilizarse para ilustrar una cavidad de guía de ondas CRLH según esta realización.

En una realización relacionada, los medios acopladores comprenden una pluralidad de acopladores de energía electromagnética espaciados entre sí. Estos medios acopladores pueden comprender una ranura en la pared de la sección de guía de ondas CRLH.

5 En una realización relacionada, una o más guías de ondas CRLH en la sección de guía de ondas CRLH tienen un segundo extremo cortocircuitado.

El aparato de reactor LA MPCVD anterior puede comprender una fuente de energía electromagnética que tiene una salida de energía, y en donde una o más guías de ondas CRLH en la sección de guía de ondas CRLH tiene un primer extremo de entrada de energía acoplado a la salida de energía de la fuente de energía electromagnética.

Se puede conectar un dispositivo de sintonización entre la salida de energía y la entrada de energía.

10 Una o más guías de ondas CRLH en la sección de guía de ondas CRLH pueden tener un segundo extremo cortocircuitado, como se ilustra en la Figura 3. Aquí, el extremo cortocircuitado está opuesto al primer extremo de entrada de energía.

15 En una segunda realización que se ilustra, p. ej. Figura 7A, la cámara de reactor comprende una primera y una segunda subcámara, en donde la primera subcámara comprende los medios acopladores, y la segunda subcámara se adapta para comprender la región de plasma. La energía electromagnética se proporciona desde la sección de guía de ondas CRLH a la segunda subcámara a través de la primera subcámara. Otros elementos además de la cámara de reactor pueden ser los mismos que en la primera realización.

Las subcámaras primera y segunda pueden tener en una sección transversal la misma área.

20 La segunda subcámara puede comprender ventanas de cuarzo dispuestas para separar la región de plasma de la presión atmosférica.

Las subcámaras primera y segunda pueden disponerse una encima de otra e interconectarse en cada extremo como se ilustra en la Figura 7A.

La energía electromagnética puede ser energía de microondas en la primera frecuencia, en donde la primera frecuencia puede ser, en una realización relacionada, 2,45 GHz.

25 El aparato de reactor LA MPCVD puede comprender una o más guías de ondas CRLH.

En una tercera realización que puede combinarse con cualquiera de las realizaciones anteriores, la sección de guía de ondas CRLH comprende una pluralidad de secciones de guía de ondas CRLH dispuestas una al lado de otra, como se ilustra en la Figura 3.

30 En una cuarta realización que puede combinarse con cualquiera de las realizaciones anteriores, el aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la sección de guía de ondas CRLH comprende celdas unitarias en cascada periódicamente.

En una realización relacionada, la relación de celdas unitarias entre la frecuencia y el cambio de fase puede configurarse.

35 Para configurar las celdas unitarias, las celdas unitarias comprenden en una realización relacionada elementos de sintonización configurados para modificar las dimensiones internas de las celdas unitarias. Los elementos de sintonización pueden ser un par de espigas dispuestas para insertarse en cada una de las celdas unitarias como se ilustra en las Figuras 14A, 14B y 14C.

40 En una realización, la invención es un método para proporcionar una deposición química de vapor de plasma de área grande en una cámara de reactor en donde la cámara de reactor se dispone para proporcionar una región de plasma en un interior de la cámara de reactor por energía electromagnética en una primera frecuencia. El método comprende acoplar energía electromagnética desde el interior de la sección de guía de ondas CRLH al interior de la cámara de reactor a través de un medio acoplador de pared de la sección CRLH, en donde la sección de guía de ondas CRLH se dispone para operar con una longitud de onda infinita en la primera frecuencia. Los medios acopladores de pared pueden ser aquí ranuras como se ilustra, p. ej. en la Figura 3.

45 En una realización, la sección de guía de ondas CRLH comprende celdas unitarias en cascada periódicamente.

En una realización relacionada, las celdas unitarias pueden comprender elementos de sintonización configurados para modificar las dimensiones internas de las celdas unitarias, en donde el método comprende ajustar los elementos de sintonización.

50 En una realización relacionada, una fuente de energía electromagnética que tiene una salida de energía se conecta a una entrada de la sección de guía de ondas CRLH, en donde el método comprende minimizar una potencia reflejada medida ajustando iterativamente los elementos de sintonización y haciendo coincidir la impedancia de la fuente con la

sección de guía de ondas CRLH.

Los elementos de sintonización pueden ser, p. ej. espigas como se ilustra en la Figura 14A, 14B y 14C.

Además, la cámara de reactor y la sección de guía de ondas CRLH del método pueden comprender características de cualquiera de las realizaciones para el reactor LA MPCVD anterior.

5 Realización específica

A continuación, se describe una realización de la invención con referencia a los dibujos adjuntos. En general, esta realización describe un reactor LA MPCVD que comprende varias guías de ondas CRLH colocadas una al lado de otra, p. ej. cuatro como se ilustra en la Figura 3. Las cuatro guías de ondas mostradas en la Figura 3 se colocan de tal manera que el vector de corriente magnética apunta en la misma dirección. Se pueden usar otras configuraciones que consisten en cualquier número de guías de ondas CRLH colocadas una al lado de otra.

La cavidad resonante se coloca en la parte superior de las guías de ondas CRLH. En la Figura 4a se muestra un modelo CAD en 3D de la cavidad resonante correspondiente en la parte superior de las cuatro guías de ondas CRLH. El tamaño de la cavidad resonante se determina por el área ocupada por las ranuras radiantes. La altura h de la cámara se elige para que sea aproximadamente la mitad de la longitud de onda de la radiación de microondas acoplada en la cavidad. Es importante tener en cuenta que el tamaño de la cavidad resonante de reactor LA MPCVD se puede escalar simplemente cambiando la longitud y el número de guías de onda CRLH, es decir, para alterar el área ocupada por las ranuras de radiación.

La radiación de microondas se acopla magnéticamente en la cavidad resonante. La vista en sección transversal en el plano yz de la cavidad resonante representada en la Figura 4a se muestra en la Figura 5, donde las flechas indican la dirección y la fuerza del campo magnético inducido por los elementos de ranura radiantes.

El campo magnético alterno genera un campo eléctrico uniforme en la dirección perpendicular del campo magnético a través de un área grande de la cavidad resonante como se muestra en la Figura 4b. Las secciones transversales de la distribución del campo eléctrico en los planos xy, xz y yz se muestran en la Figura 6.

El campo eléctrico uniforme ioniza un gas de trabajo y produce un plasma uniforme en un área grande, véase el contorno discontinuo en la Figura 6. La cámara de deposición del reactor debe estar separada de la presión atmosférica. Esto se logra colocando una ventana de cuarzo justo encima de los elementos radiantes. Sin embargo, colocar la ventana de cuarzo cerca de la región del plasma impone varias limitaciones. En primer lugar, las cavidades de área grande requieren grandes ventanas de cuarzo. El grosor de la ventana aumenta con el área para soportar la presión atmosférica. Como resultado, al aumentar el área de la cavidad, la superficie de la ventana se acerca a la región del plasma. En segundo lugar, el plasma caliente puede generar altas cargas de calor en la ventana y dañarla. El daño térmico en la ventana se puede evitar reduciendo la presión de trabajo en la cámara hasta un orden de mbar, limitando así la temperatura de deposición del proceso de deposición de vapor químico.

Para superar este problema se propone otro diseño de la cavidad resonante. La nueva cavidad consiste en volúmenes superior e inferior interconectados, o subcámaras primera y segunda, como se muestra en la Figura 7a. Cada volumen tiene una altura h y puede ocupar un área similar a la cavidad mostrada en la Figura 4a. La distancia entre dos volúmenes puede variar de 130 mm a 170 mm. Seleccionar una distancia diferente entre los volúmenes produce diferentes distribuciones de campo eléctrico en las partes superior e inferior.

La Figura 7a ilustra en un modelo CAD 3D de la cavidad resonante. Las secciones transversales de las distribuciones de campo eléctrico en los planos yz- y xz- se ilustran en la Figura 7b.

De manera similar al diseño de cavidad resonante anterior, la radiación de microondas se acopla magnéticamente al volumen inferior, o primera subcámara, como se muestra en la Figura 8. La onda electromagnética se propaga más a través de las guías de ondas de conexión hasta el volumen superior o segunda subcámara, produciendo un patrón de intensidad de campo magnético similar al que se muestra en la Figura 5.

En las realizaciones anteriores, la cavidad resonante se ha ilustrado dispuesta encima de la sección de guía de ondas CRLH. Sin embargo, la cavidad resonante bien puede disponerse, p. ej. debajo o al lado de la guía de ondas CRLH.

Las dimensiones relativas de altura, anchura y longitud de la cámara resonante y las subcámaras primera y segunda relativas, así como el tamaño relativo entre las cámaras primera y segunda, y la distancia entre ellas también pueden variar, siempre que operen en la primera frecuencia.

La guía de ondas CRLH o las guías de ondas en la sección de guía de ondas CRLH también pueden tener diferentes configuraciones. Cualquier diseño de guía de ondas con celdas unitarias del tipo especificado anteriormente, p. ej. curvo, puede ser potencialmente utilizado para este propósito. En lugar de estar en cortocircuitado, pueden, p. ej. estar interconectados en serie.

Los medios acopladores, tales como una o más ranuras en las guías de ondas CRLH, se pueden disponer en cualquier pared, es decir, paredes laterales, superiores o inferiores de las guías de ondas CRLH. Preferiblemente cuando la

distribución de densidad de campo es longitudinal, para contribuir a una región de plasma agrandada en la cavidad resonante.

El diseño de cavidad resonante que consiste en volúmenes superior e inferior supera el problema de las grandes ventanas de cuarzo. Ahora, las ventanas de cuarzo se pueden colocar en varios lugares alejados del plasma caliente, como se muestra en la Figura 9. Los contornos discontinuos muestran las ubicaciones verticales y horizontales de las ventanas de cuarzo. Las ubicaciones se seleccionan intencionalmente en lugares donde el campo eléctrico es mínimo. La configuración completa del reactor LA MPCVD con ventanas de cuarzo ubicadas horizontalmente se muestra en la Figura 10. Las cuatro guías de ondas CRLH se conectan con un conjunto de uniones en T y se excitan mediante un orificio de guía de ondas.

A continuación, se explicará una realización de la guía de ondas CRLH. Esta realización se puede combinar con cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente.

El acoplamiento de la radiación de microondas dentro de la cavidad resonante del reactor LA MPCVD se puede lograr utilizando un conjunto de guías de onda derecha/izquierda compuestas ranuradas (CRLH), cada una de las cuales tiene la propiedad de propagación de longitud de onda infinita. Esto permite generar un campo eléctrico uniforme de alta intensidad en un área grande dentro de la cavidad. La teoría sobre las líneas de transmisión CRLH se puede encontrar en la bibliografía, p. ej.;

- A. Lai et al. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. IEEE Microwave Magazine (Volumen: 5, Número: 3, septiembre de 2004).
- Amr M. Nour Eldeen e Islam A. Eshrah. CRLH Waveguide with Air-Filled Double-Ridge Corrugations. 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI).
- T.Ueda et al. Dielectric-Resonator-Based Composite Right/Left-Handed Transmission Lines and Their Application to Leaky Wave Antenna. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volumen: 56, Número: 10 de oct. 2008).
- L. Shaowei et al. Left-Handed Transmission Line Based on Resonant-Slot Coupled Cavity Chain. IEEE Microwave and Wireless Components Letters (Volumen: 17, Número: 4 de abril de 2007).
- Y. Chen et al. Unequally Spaced and Excited Resonant Slotted - Waveguide Antenna Array Based on an Improved Resonant - Slot Coupled Cavity Chain Composite Right / Left - Handed Waveguide. Progress In Electromagnetics Research, vol. 110, 421-435, 2010.
- C. Caloz et al. Composite right/left-handed transmission line metamaterials, IEEE Microwave magazine, vol. 5, núm. 3, páginas 34-50, 2004.

La guía de ondas CRLH consiste en una cadena de celdas unitarias en cascada periódicamente. Cada celda unitaria tiene la propiedad única de soportar la propagación de ondas a izquierda (LH) y a derecha (RH) y se puede representar usando un modelo de circuito equivalente como lo describen Ueda et al. arriba. En el caso equilibrado, una celda unitaria no tiene una banda de parada y hay una transición continua de las bandas LH a RH en el diagrama de dispersión. Dado que la invención propuesta utiliza una propiedad de propagación de longitud de onda infinita de la guía de ondas CRLH, cada celda unitaria de la guía de ondas debe equilibrarse. Este criterio puede cumplirse con diferentes diseños de la celda unitaria, por ejemplo, con los propuestos en las referencias Elden y Esrah, Uead et al., Shaowei et al. y Chen et al. arriba.

La realización actual de la guía de ondas CRLH emplea un diseño similar de la celda unitaria como se describe Chen et al. La celda unitaria mostrada en la Figura 13A se diseña de tal manera que el diagrama de dispersión representado en la Figura 13B tiene una transición perfecta de las bandas LH a RH y, por lo tanto, la celda está equilibrada. Como puede verse en 13B, la frecuencia de propagación de longitud de onda infinita es de 2,45 GHz y coincide con la frecuencia de trabajo de la fuente de energía o generador de microondas.

La celda unitaria se puede realizar en diversas formas geométricas y admitir una frecuencia de propagación de longitud de onda infinita distinta de 2,45 GHz.

La guía de ondas CRLH consiste en una formación de celdas unitarias en cascada periódicamente y termina con una pared metálica como se muestra en la Figura 3. La radiación de microondas a la guía de ondas CRLH se alimenta a través de la guía de ondas de transición. Debido a la propiedad de propagación de longitud de onda infinita de la guía de ondas CRLH, la corriente superficial a lo largo de la guía de ondas (dirección z) fluye sin interrupciones, como se muestra en las Figuras 2 y 3. Por lo tanto, los elementos de ranura radiante utilizados para acoplar la radiación de microondas en la cavidad se pueden colocar en posiciones casi arbitrariamente, y cercanas entre sí, en comparación con las guías de ondas convencionales donde las ranuras adyacentes están separadas por la mitad de la longitud de onda de la guía (λ_g). Por lo tanto, con la invención se puede lograr una distribución uniforme del campo electromagnético sobre un área grande.

El mecanismo de radiación de las ranuras es el mismo que para las guías de ondas convencionales y la cantidad de radiación de cada ranura se determina por la corriente interceptada. Como resultado, la potencia de radiación de la ranura depende del ángulo de inclinación con respecto a la línea central correspondiente de la guía de ondas CRLH. Aquí, todas las ranuras se giran 45 grados para maximizar la potencia de radiación.

- 5 Un efecto de la invención es que la cavidad de reactor se puede escalar. Esto se puede hacer extendiendo las guías de ondas CRLH o añadiendo más guías de ondas como se ha indicado anteriormente. Esto aumentaría eficazmente el tamaño de la región de plasma generado.

- Otro efecto es que el LA MPCVD según realizaciones de la invención puede funcionar en un intervalo de presión superior al subbar mientras que otras implementaciones de reactores LA MPCVD, p. ej. con guías de ondas estándar, solo pueden funcionar con presiones más bajas.

- 10 Esto se logra debido a la novedosa tecnología de acoplamiento que se hace posible gracias a las guías de ondas CRLH, que produce una forma bastante uniforme y poco profunda del plasma en el área de deposición en comparación con la técnica anterior. La altura del plasma es inferior a la mitad de la longitud de onda a 2,45 GHz, lo que significa que el plasma puede absorber eficazmente la radiación de microondas de entrada. Esto produce altas densidades de potencia absorbida que permiten operar a presiones más altas.

La celda unitaria puede diseñarse de tal manera que el cambio de fase por celda unitaria para la frecuencia de trabajo de 2,45 GHz sea cero.

- 20 Un cambio de fase por celda unitaria de cero para otras frecuencias distintas de 2,45 GHz o cualquier otra frecuencia operativa, puede lograrse en una realización que puede combinarse con cualquiera de las realizaciones anteriores, cambiando las dimensiones de la celda unitaria. Esto es particularmente importante para los generadores de microondas cuya frecuencia operativa no está bloqueada y es función de la potencia de salida. Normalmente, la frecuencia de los magnetrones industriales aumenta con la potencia y puede desviarse de la frecuencia nominal en un orden de ± 1 %. Por lo tanto, la forma de la celda unitaria se puede adaptar activamente para tener en cuenta el cambio de la frecuencia de trabajo a medida que cambia la potencia de salida del generador.

- 25 En una realización relacionada, el cambio de forma de la celda unitaria se logra de tal manera que el cambio de fase por celda unitaria para cualquier frecuencia es cero. Todas las celdas en la(s) guía(s) de ondas CRLH se pueden adaptar simultáneamente. En la Figura 15 se muestra un diagrama de bloques que ilustra un método de control adaptativo de las celdas unitarias.

- 30 El método comienza configurando la potencia de salida del generador de microondas y midiendo la frecuencia de trabajo correspondiente. A continuación, las formas de todas las celdas unitarias se cambian ajustando ciertas dimensiones de las celdas o insertando elementos de sintonización como espigas y manteniendo las celdas equilibradas. La forma de cada celda unitaria debe alterarse de la misma manera usando entradas de las simulaciones o datos empíricos. La frecuencia de las celdas ajustadas debe coincidir con la frecuencia de trabajo medida en la etapa anterior. Después del ajuste de las celdas, la impedancia que ve el generador puede combinarse con una unidad de adaptación de impedancia, como un sintonizador de 3 espigas dispuesto entre la fuente de energía y la guía de ondas CRLH. La potencia reflejada P_{ref} medida en esta etapa se guarda para su uso posterior. Dado que las entradas utilizadas para el ajuste de celdas tienen errores, en la siguiente etapa, las celdas deben modificarse en una pequeña cantidad en comparación con el ajuste en la tercera etapa. A continuación, se hace coincidir de nuevo la impedancia y se mide la correspondiente potencia reflejada P'_{ref} . Por último, se comparan P_{ref} y P'_{ref} . Si $P'_{ref} < P_{ref}$, las celdas se alteran nuevamente, seguidas de una etapa de adaptación de impedancia y una nueva medición de potencia reflejada. Estas etapas se repiten iterativamente hasta que se minimiza la potencia reflejada. Si se cambia la potencia de salida del generador, el procedimiento se repite de nuevo.

- 40 El control adaptativo de la celda unitaria, por ejemplo, se puede lograr insertando simultáneamente dos espigas (truncadas) en la parte inferior de la celda, como se muestra en la Figura 14. La celda unitaria se puede describir usando un modelo de circuito equivalente al descomponer la celda en un conjunto de corrugaciones, espiga y guía de ondas rectangular con las correspondientes inductancias en derivación, capacitancia en serie e inductancia en serie y capacitancia en derivación. Por lo tanto, insertar espigas (truncadas) en la celda cambia eficazmente las inductancias y capacitancias de los elementos de la celda.

- 45 Como resultado, la frecuencia que corresponde a un cambio de fase por celda unitaria de cero cambia. Esto permite controlar de forma adaptativa cada celda unitaria en una(s) guía(s) de ondas CRLH. La profundidad de inserción de las espigas debe elegirse para que coincida con la frecuencia de trabajo del generador, de modo que la densidad de corriente superficial de la guía de ondas permanezca uniforme y sin cambios. Las celdas unitarias deben mantenerse equilibradas durante el proceso.

- 50 La deposición química de vapor, CVD, de material de diamante se puede realizar de la siguiente manera. El campo eléctrico uniforme mostrado en la Figura 7B y la Figura 9 ioniza el gas de trabajo y produce un plasma uniforme en un área grande, como se muestra en la Figura 11.

Los gases de trabajo típicos para el proceso CVD de diamante son hidrógeno y metano. El metano actúa como fuente

- de carbono y el hidrógeno atómico, disociado del gas molecular por plasma, es necesario para grabar selectivamente el contenido gráfico en el proceso. Se pueden introducir otros gases como nitrógeno, oxígeno o argón hacia la cámara para alterar los parámetros del proceso de CVD, como la tasa de crecimiento y la temperatura del sustrato. La representación esquemática de una realización del reactor LA MPCVD se muestra en la Figura 12. Es importante tener en cuenta que los planos superior e inferior de la cavidad de la cámara presentada, es decir, la segunda subcámara, se pueden utilizar para el proceso de deposición. Aquí, solo se presenta el proceso de deposición en los planos inferiores.
- El gas de trabajo se introduce desde la parte superior de la segunda subcámara. El gas se entrega al sustrato usando tubos colocados sobre el sustrato. Cada tubo contiene un conjunto de orificios para una distribución uniforme de gas en toda el área de deposición.
- La región de plasma se indica por una figura elíptica roja en el centro de la Figura 12A. Cubre una platina de sustrato representada por un rectángulo magenta. El material de diamante se deposita sobre el sustrato colocado encima de la platina. El sustrato se calienta con plasma, pero si es necesario, la platina también se puede calentar con inducción de RF u otros medios.
- El gas de proceso puede salir de la cámara utilizando una bomba de vacío. La velocidad de bombeo puede ajustarse activamente durante el proceso de CVD para mantener estable la presión.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de reactor (1) de deposición química de vapor de plasma de microondas de área grande, LA MPCVD, que comprende;
5 una cámara de reactor (2) adaptada para proporcionar una región de plasma en el interior de la cámara de reactor mediante energía electromagnética a una primera frecuencia, y
una sección de guía de ondas (3) compuesta derecha/izquierda, CRLH, adaptada para operar con una longitud de onda infinita en la primera frecuencia y que tiene en una pared unos medios acopladores (4) dispuestos para acoplar energía electromagnética desde un interior de la sección de guía de ondas CRLH al interior de la cámara de reactor.
- 10 2. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 1, en donde los medios acopladores comprenden una pluralidad de acopladores de energía electromagnética espaciados entre sí.
3. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 1 o 2, en donde los medios acopladores comprenden una ranura en la pared de la sección de guía de ondas CRLH.
- 15 4. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 1, 2 o 3, que comprende una fuente de energía electromagnética que tiene una salida de energía, y en donde una o más guías de ondas CRLH en la sección de guía de ondas CRLH tienen un primer extremo de entrada de energía acoplado a la salida de energía.
5. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 4, en donde una o más guías de ondas CRLH en la sección de guía de ondas CRLH tiene un segundo extremo cortocircuitado.
- 20 6. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la cámara de reactor comprende una primera subcámara y una segunda subcámara, en donde la primera subcámara comprende los medios acopladores, y la segunda subcámara se adapta para comprender la región de plasma, y en donde la energía electromagnética se proporciona desde la sección de guía de ondas CRLH a la segunda subcámara a través de la primera subcámara.
- 25 7. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 6, en donde la primera subcámara y la segunda subcámara tienen la misma área en sección transversal.
8. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 6 o 7, en donde la segunda subcámara comprende ventanas de cuarzo dispuestas para separar la región de plasma de la presión atmosférica.
9. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8 anteriores, en donde la primera subcámara y la segunda subcámara se disponen una encima de otra e interconectadas en cada extremo.
- 30 10. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la energía electromagnética es energía de microondas en la primera frecuencia.
11. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera frecuencia es 2,45 GHz.
- 35 12. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la sección de guía de ondas CRLH comprende una pluralidad de guías de ondas CRLH dispuestas una al lado de otra.
13. El aparato de reactor LA MPCVD de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la sección de guía de ondas CRLH comprende celdas unitarias en cascada periódicamente, en donde la relación de celdas unitarias en cascada periódicamente entre la frecuencia y el cambio de fase es configurable.
- 40 14. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 13, en donde las celdas unitarias en cascada periódicamente comprenden elementos de sintonización configurados para modificar las dimensiones internas de las celdas unitarias en cascada periódicamente.
15. El aparato de reactor LA MPCVD de la reivindicación 14, en donde los elementos de sintonización comprenden un par de espigas dispuestas para ser insertadas en las celdas unitarias en cascada periódicamente.
- 45 16. Un método para proporcionar una deposición química de vapor de plasma de área grande en una cámara de reactor (2) en donde la cámara de reactor se dispone para proporcionar una región de plasma en el interior de la cámara de reactor mediante energía electromagnética a una primera frecuencia, en donde el método comprende:
acoplar la energía electromagnética desde el interior de una sección de guía de ondas (3) compuesta a derecha/izquierda, CRLH, al interior de la cámara de reactor a través de un medio acoplador de pared (4) de la sección de guía de ondas CRLH, en donde la sección de guía de ondas CRLH se dispone para operar con una
50 longitud de onda infinita en la primera frecuencia.

17. El método de la reivindicación 16, en donde una sección de guía de ondas CRLH comprende celdas unitarias en cascada periódicamente que comprenden elementos de sintonización configurados para modificar las dimensiones internas de las celdas unitarias en cascada periódicamente, en donde el método comprende ajustar los elementos de sintonización.
- 5 18. El método de la reivindicación 17, en donde una fuente de energía electromagnética que tiene una salida de energía se conecta a una entrada de la sección de guía de ondas CRLH, en donde el método comprende minimizar una potencia reflejada medida mediante el ajuste iterativo de los elementos de sintonización y haciendo coincidir a impedancia de la fuente de energía electromagnética con la sección de guía de ondas CRLH.

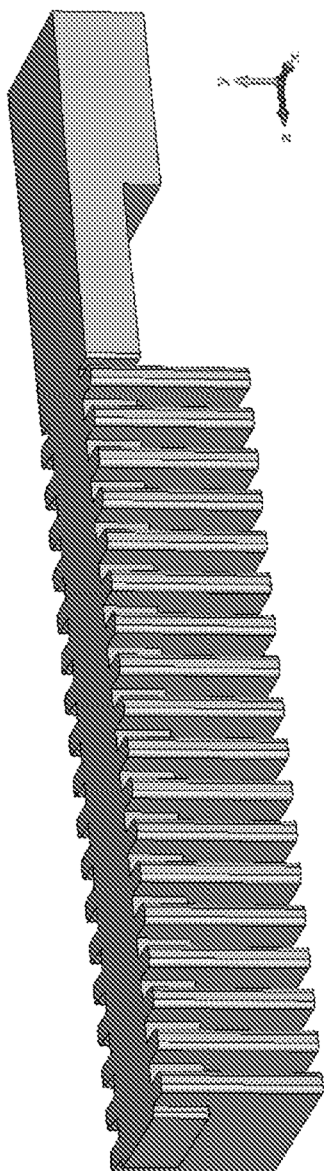


Fig. 1

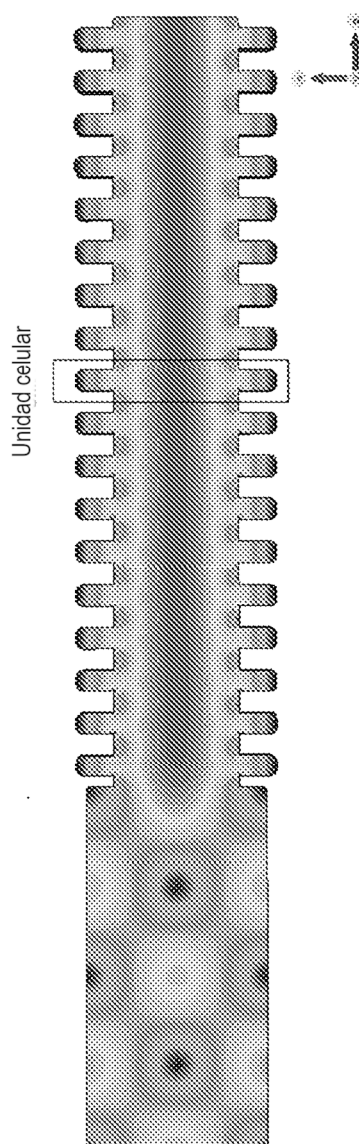


Fig. 2

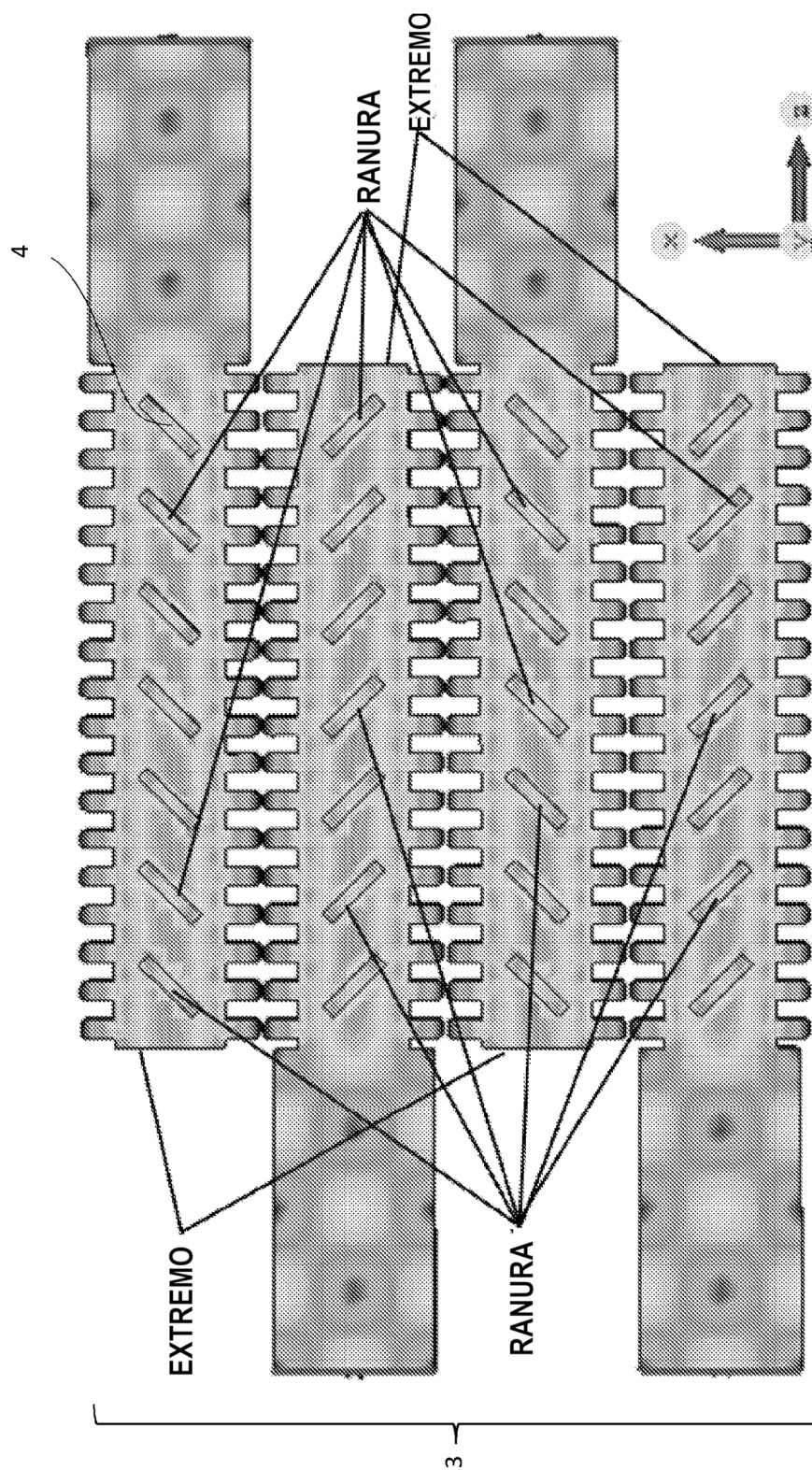


Fig. 3

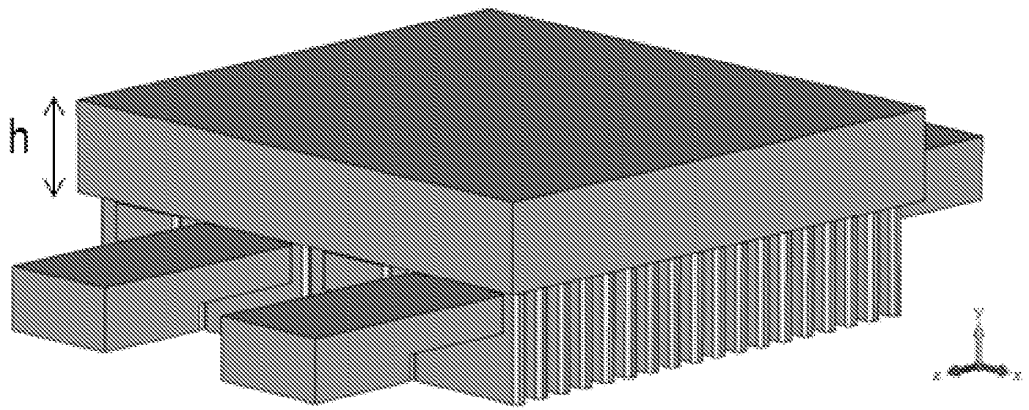


Fig. 4a

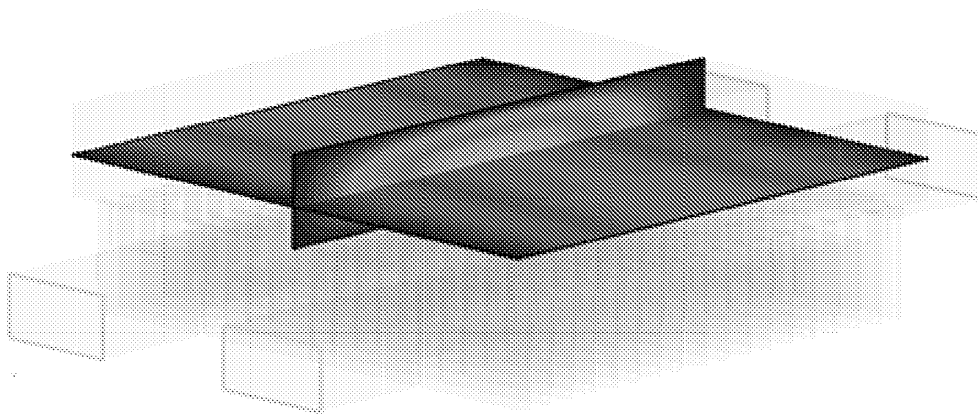


Fig. 4b

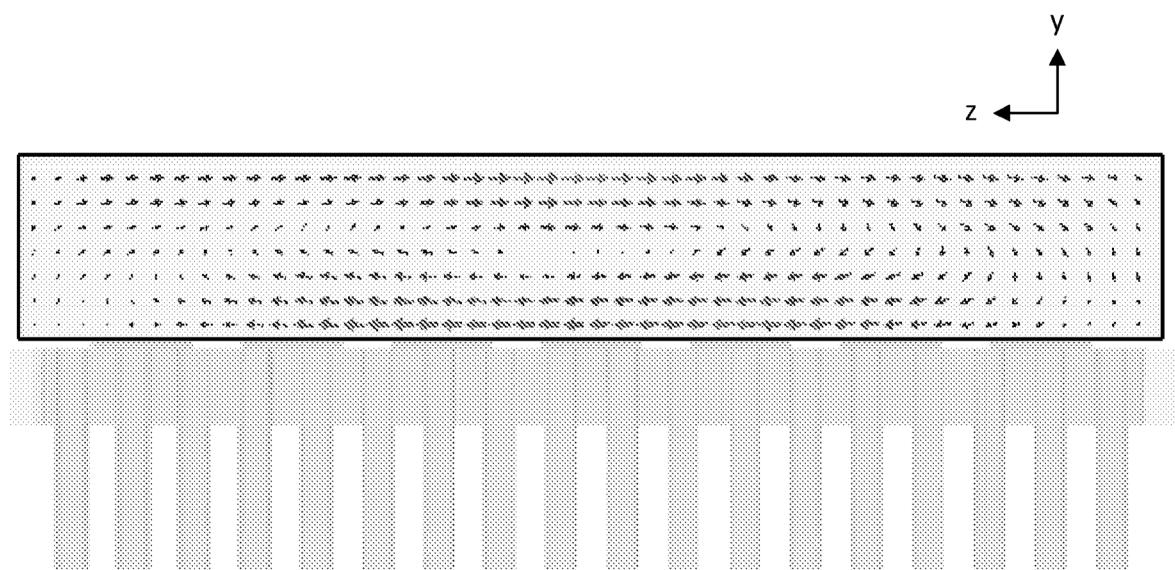


Fig. 5

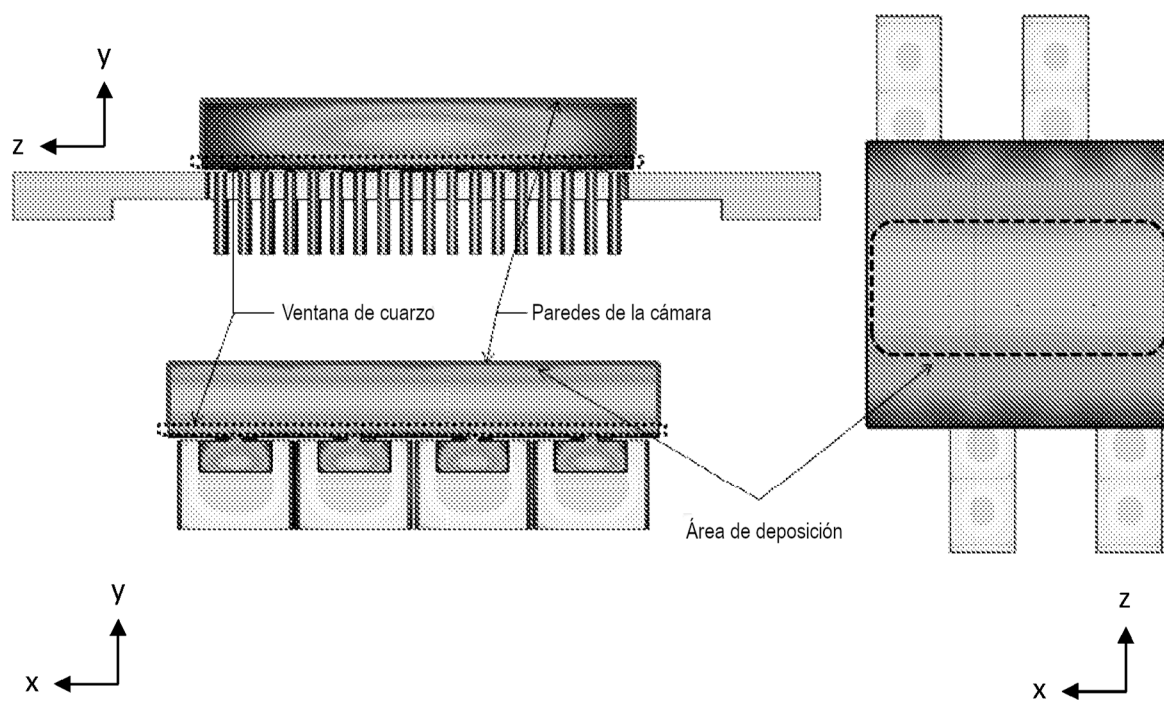


Fig. 6

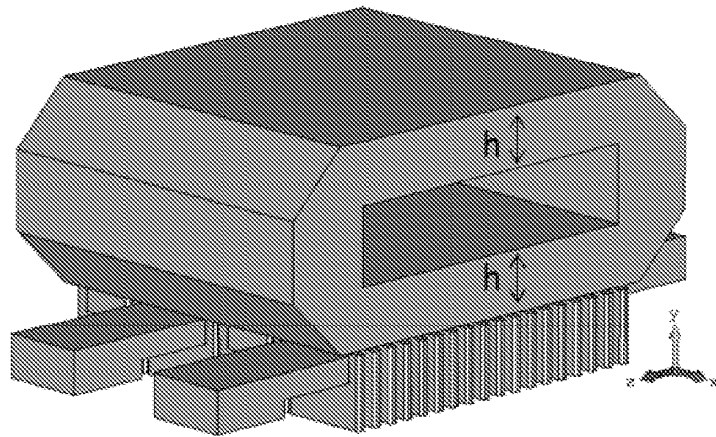


Fig. 7A

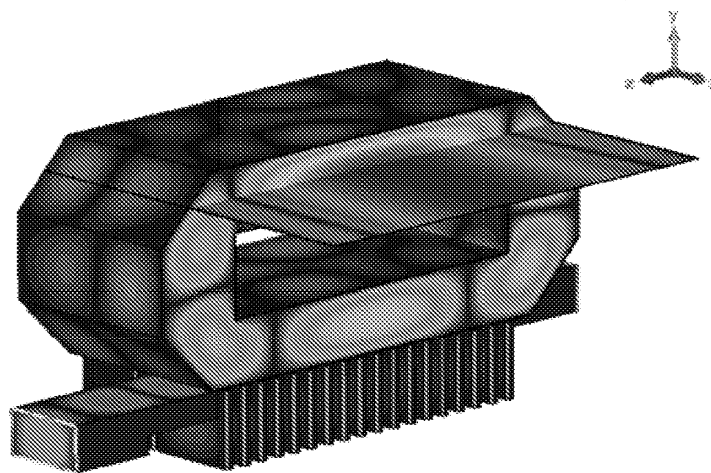


Fig. 7B

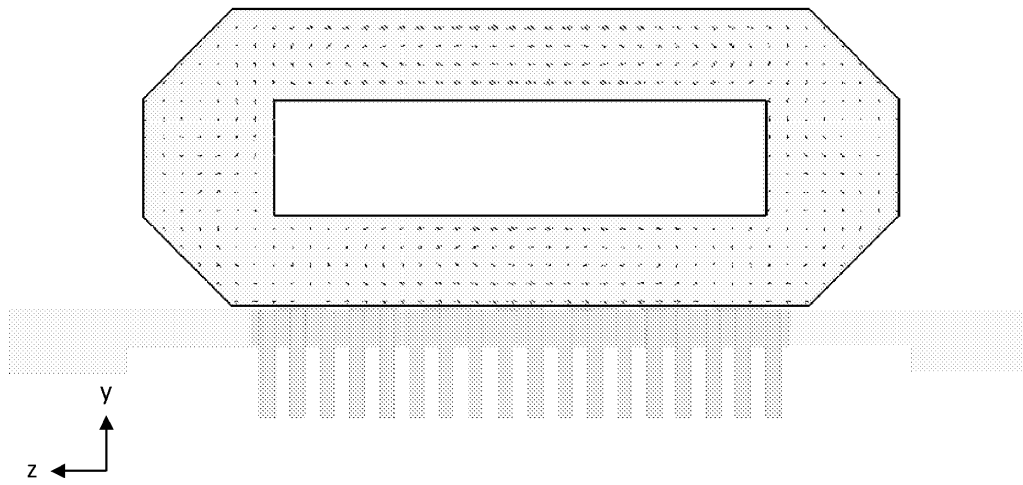


Fig. 8

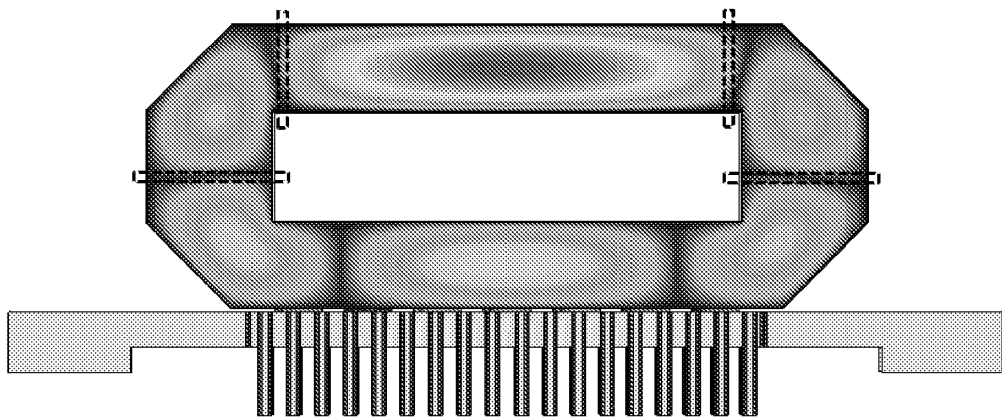


Fig. 9

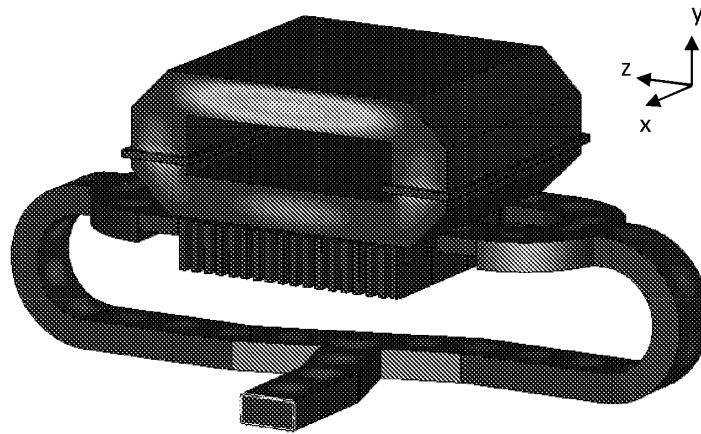


Fig. 10A

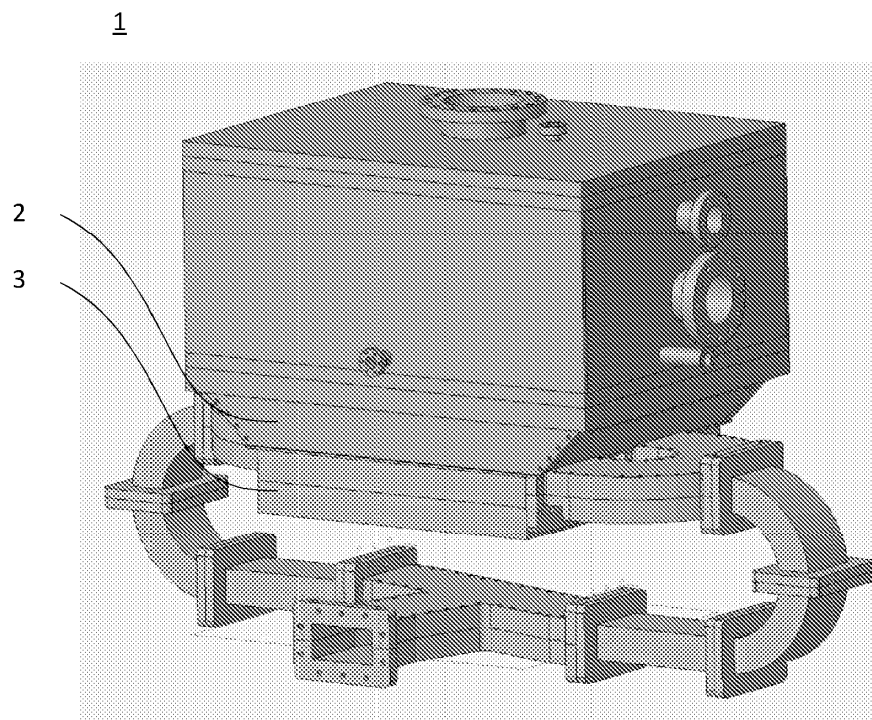


Fig. 10B

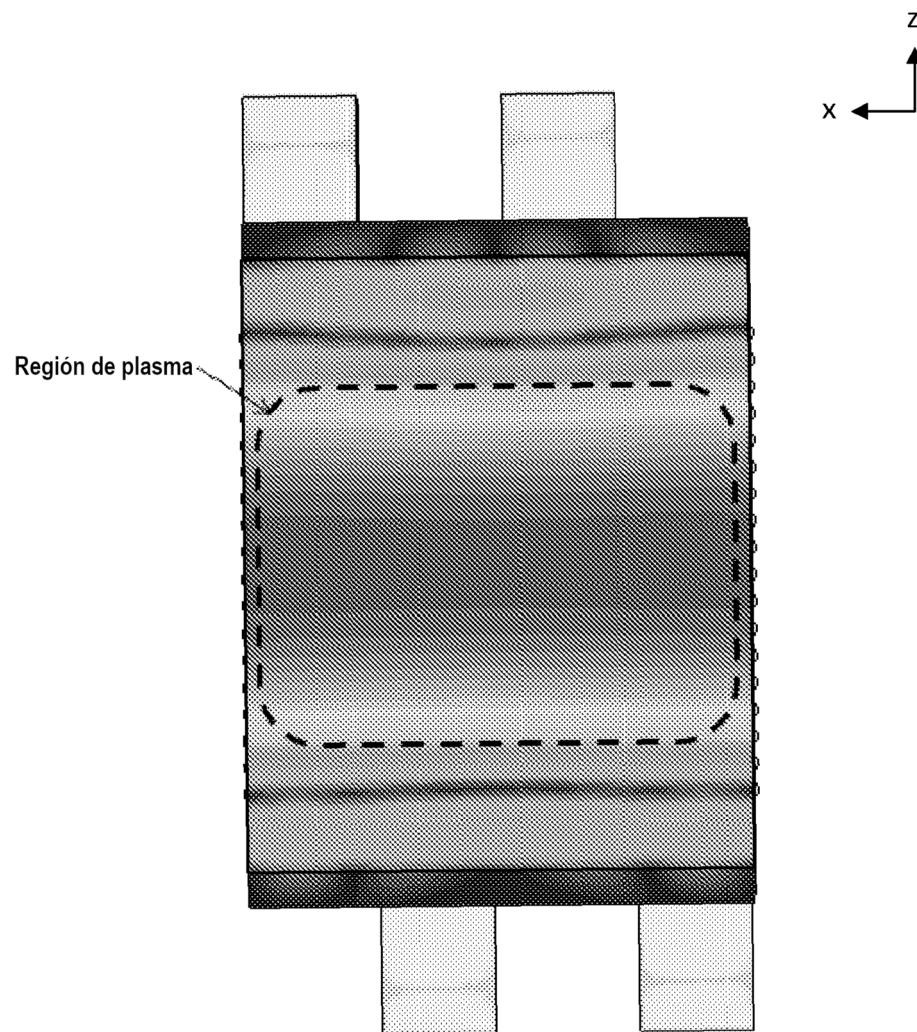


Fig. 11

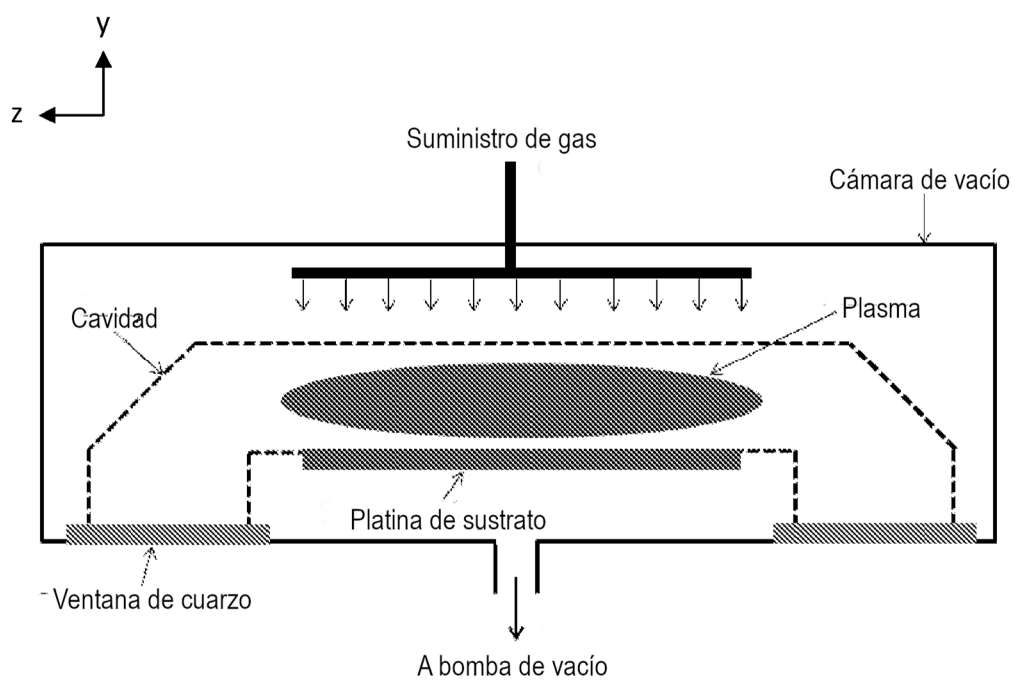


Fig. 12A

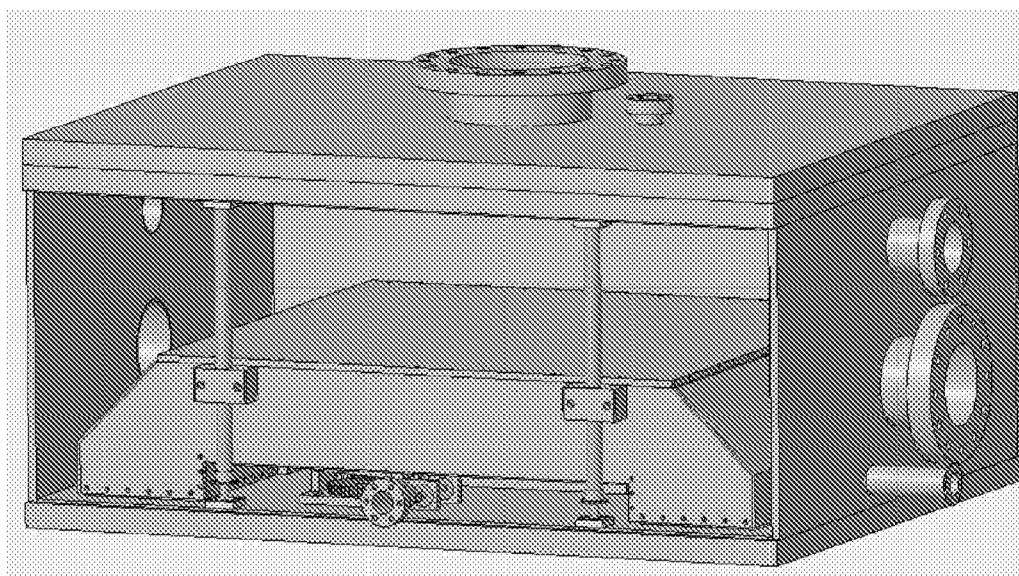


Fig. 12B

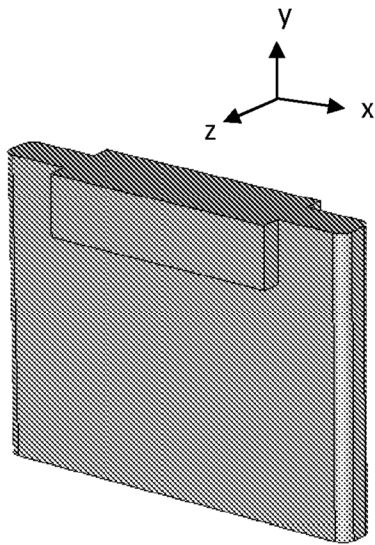


Fig. 13A

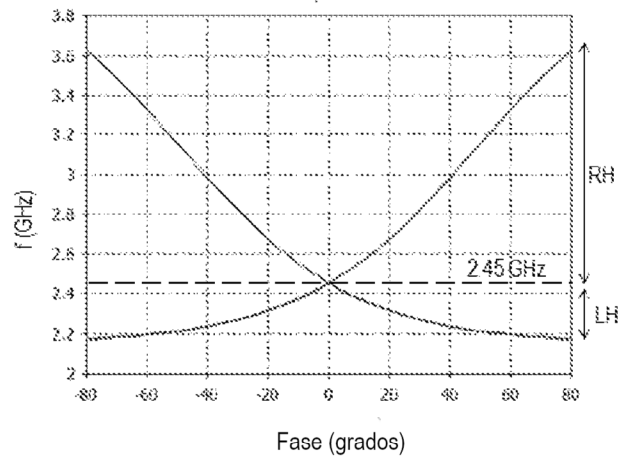


Fig. 13B

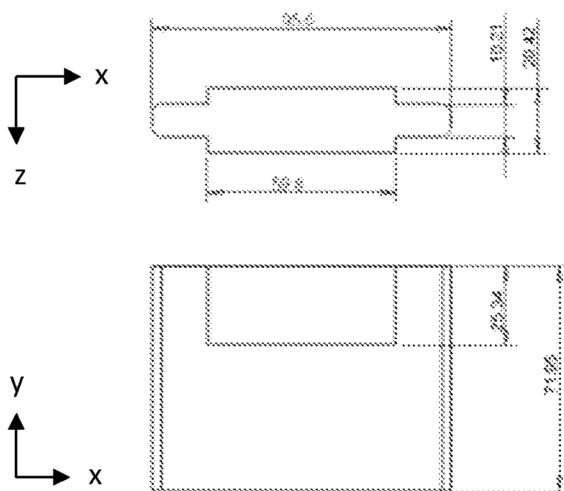


Fig. 13C

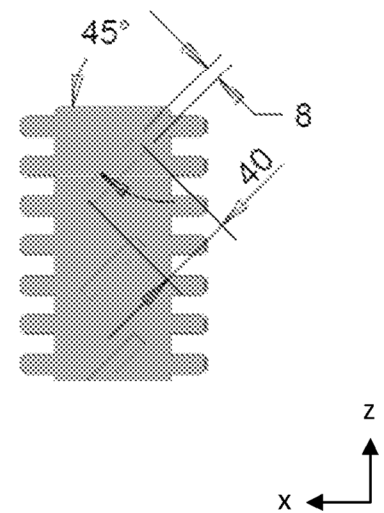


Fig. 13D

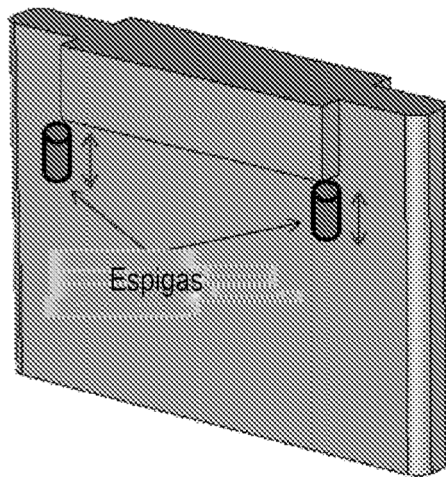


Fig. 14A

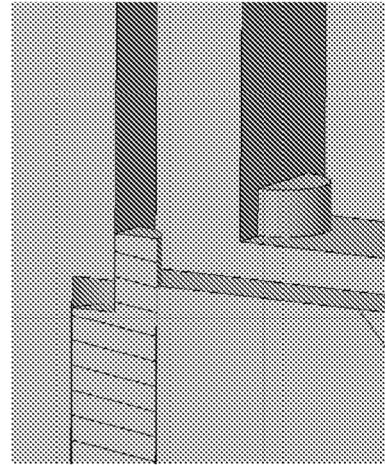


Fig. 14C

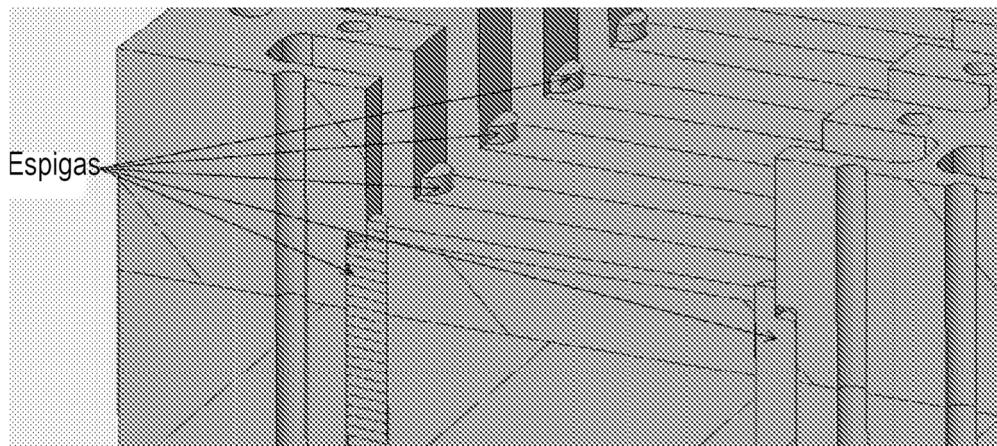


Fig. 14B

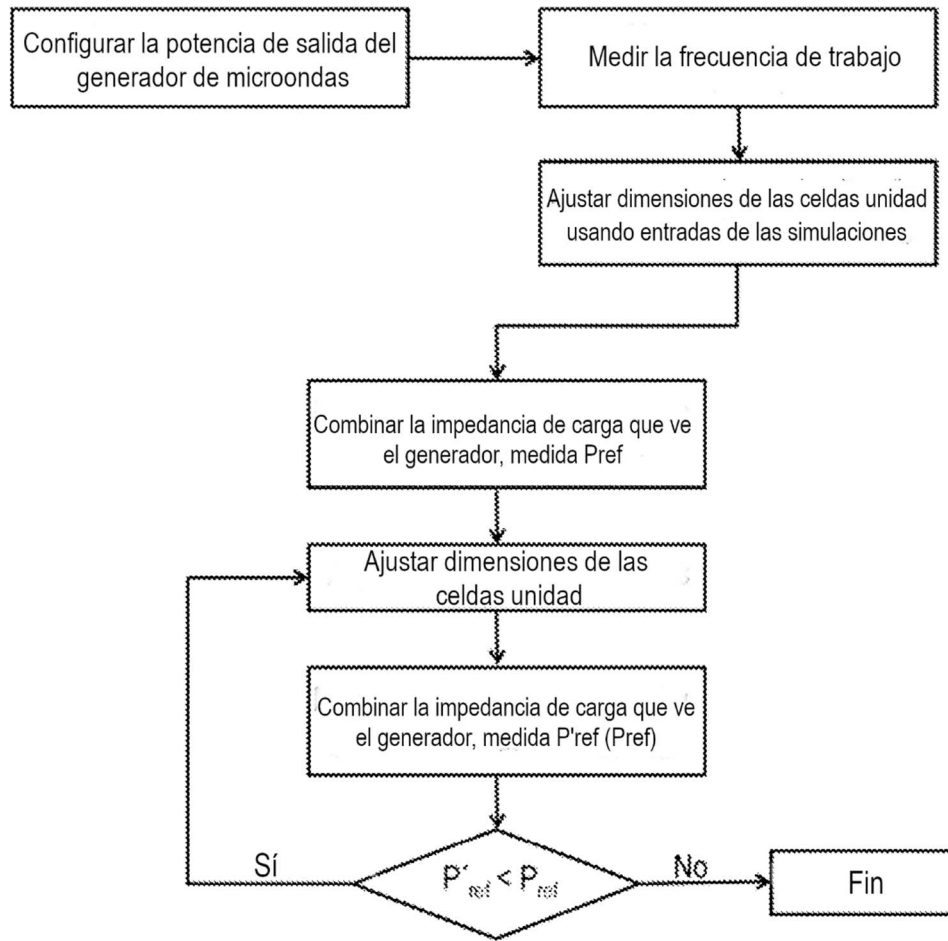


Fig. 15