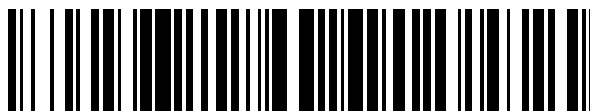


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 792 911**

51 Int. Cl.:

H01J 37/32 (2006.01)

H01J 37/34 (2006.01)

C23C 14/35 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2014** **E 14190737 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.02.2020** **EP 2866246**

54 Título: **Sistema de capa de vacío y tratamiento con plasma, y procedimiento para recubrir un sustrato**

30 Prioridad:

28.10.2013 US 201314064617

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

12.11.2020

73 Titular/es:

**VAPOR TECHNOLOGIES, INC. (100.0%)
6400 Dry Creek Parkway
Longmont CO 80503, US**

72 Inventor/es:

**GOROKHOVSKY, VLADIMIR;
GRANT, WILLIAM;
TAYLOR, EDWARD y
HUMENIK, DAVID**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 792 911 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

Sistema de capa de vacío y tratamiento con plasma, y procedimiento para recubrir un sustrato

5 CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un sistema de deposición asistido por plasma y un procedimiento relacionado.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

10

Las fuentes de deposición física de vapor (PVD) y la deposición química de vapor con baja presión (CVD) se usan para la deposición de recubrimientos y tratamiento de superficie. Las fuentes de vapor de metal convencionales, tales como la deposición física por haz de electrones (EBPVD) y pulverización catódica con magnetrón (MS) de vapor de metal pueden proporcionar altas velocidades de deposición. Sin embargo, la baja energía de los átomos de vapor de metal y la baja velocidad de ionización de estos procedimientos dan como resultado recubrimientos con baja densidad, adherencia, estructura y morfología pobres. Está bien establecido que la asistencia del procedimiento de deposición del recubrimiento con bombardeo de partículas energéticas mejora dramáticamente los recubrimientos mediante la densificación de los materiales que se depositan, lo que reduce el tamaño de grano y la mejora de la adherencia del recubrimiento. En estos procedimientos, la capa superficial se ve afectada por una alta velocidad de bombardeo de 15 iones energéticos, lo cual modifica la movilidad de los átomos de vapor de metal que se depositan, y, en muchos casos, crea estructuras metaestables con propiedades funcionales únicas. Por otra parte, el bombardeo de iones de la superficie de recubrimiento influye sobre el comportamiento de absorción de gas mediante el incremento del coeficiente de pegajosidad de gases tales como el nitrógeno y el cambio de la naturaleza de los sitios de absorción desde sitios de fisiorción de menor energía a los sitios de quimisorción de mayor energía. Esta estrategia es especialmente productiva en la deposición de recubrimientos compuestos nanoestructurados con estructuras amorfas 20 ultrafinas o tipo vidrio.

Hay dos estrategias diferentes para proporcionar asistencia de bombardeo de iones durante los procedimientos de PVD o CVD. La deposición asistida por haz de iones (IBAD) es un procedimiento que es una gran promesa para la 30 formación de recubrimientos cerámicos densos en polímeros y otros materiales sensibles a la temperatura. El proceso de IBAD se lleva a cabo típicamente al vacío ($\sim 1 \times 10^{-5}$ Torr), en el que una cerámica se evapora térmicamente sobre un sustrato y al mismo tiempo la misma es bombardeada con iones energéticos. El haz de iones hace que los átomos depositados se mezclen con el sustrato, creando una capa escalonada, que puede mejorar la adherencia del recubrimiento y reducir la tensión de la película. Los iones incidentes también producen un "efecto de granallado" que 35 compacta y densifica la capa, reduciendo o eliminando así el crecimiento columnar.

Por ejemplo, durante el procesamiento de IBAD de películas de carbono tipo diamante (DLC), el carbono se evapora mediante una fuente de haces de electrones o es bombardeado mediante una fuente magnetrónica. El bombardeo de iones es proporcionado por una fuente de haces de iones de amplia apertura independiente, tal como un haz de iones 40 de argón. Tales haces de iones de argón no cambian la química de las películas de cultivo y sólo influye en su estructura, morfología, energía de enlace y unión átomo a átomo mediante la modificación de la red de entramado. La adición de un precursor gaseoso adecuado al haz de iones resulta en el dopaje de películas de DLC en crecimiento, proporcionando así una asistencia química de vapor durante el procedimiento de IBAD. Un ejemplo de tal dopaje de silicio de películas de DLC se deposita a partir de un haz de iones Ar + SiH₄. El flúor se puede añadir a las películas a 45 través de un haz de iones de Ar e hidrocarburo fluorado, el nitrógeno se puede añadir mediante el uso de un haz de iones de Ar y N₂, y el boro se puede añadir mediante el uso de un haz de iones de Ar+BH₄. La IBAD es un procedimiento tecnológico flexible que permite el control de las propiedades de recubrimiento en un área ampliada mediante la variación de los parámetros de procesamiento: la composición del haz de iones, la energía iónica, la corriente de iones y la relación de llegada de ion-a-átomo.

50

Aunque el procedimiento de IBAD funciona razonablemente bien, tiene limitaciones debido a su naturaleza de línea de vista, la cual es perjudicial para lograr una distribución de recubrimiento uniforme sobre los componentes de forma compleja cuando la conformidad del procedimiento de deposición de recubrimiento es importante. Además, el procedimiento de IBAD tiene una escalabilidad limitada. El procedimiento de deposición de iones por inmersión de 55 iones (PIID) supera algunas de estas limitaciones proporcionando un entorno de plasma de baja presión que envuelve de manera efectiva los sustratos a recubrir dentro de la nube de plasma uniforme. Esto resulta en una velocidad altamente uniforme de bombardeo tanto sobre los sustratos de forma compleja 3D como sobre grandes cargas. El procedimiento de PVD o CVD se usa para generar especies de vapor para el tratamiento de la superficie del sustrato. En cambio, para la IBAD, la PIID es un procedimiento sin línea de visión capaz de tratar superficies complejas sin 60 manipulación. La PIID utiliza plasma generado a partir de una descarga de gas que llena toda la cámara de

procesamiento, permitiendo así composiciones y arquitecturas complejas a recubrir. Los ejemplos de tratamiento de iones por inmersión en plasma incluyen la nitruración de iones, la nitruración de carbono, la implantación de iones y otros procedimientos de tratamiento de iones gaseosos que pueden efectuarse mediante la inmersión de un sustrato a recubrir en un plasma que contiene nitrógeno bajo una polarización negativa. Además, la corriente de electrones 5 extraída del plasma cuando los sustratos están polarizados de manera positiva puede usarse para los procedimientos de tratamiento con calor y precalentamiento. Es evidente que la característica de procesamiento sin línea de vista presenta numerosas ventajas sobre el procesamiento con línea de vista, particularmente para el procesamiento eficiente de una gran cantidad de objetos 3D. El entorno gaseoso ionizado usando durante los procedimientos de PIIID puede generarse mediante la aplicación de diferentes tipos de descargas de plasma, como descarga luminiscente, 10 descarga de RF, descarga de microondas (MW) y descarga de arco de baja presión. La descarga de arco de baja presión es particularmente ventajosa porque proporciona un plasma denso, uniforme y altamente ionizado en grandes volúmenes de procesamiento, a un bajo costo. En los procedimientos de deposición de recubrimiento asistida por plasma de descarga de arco o tratamiento iónico, los sustratos se posicionan entre el cátodo del arco y el ánodo del arco remoto dentro del área del plasma de descarga de arco. Los cátodos de filamentos termoiónicos, los cátodos 15 huecos, los cátodos fríos de evaporación de arco al vacío y las combinaciones de los mismos pueden usarse como emisores de electrones para generar un entorno de descarga de plasma de arco de baja presión. De manera alternativa, el material evaporativo conductor en sí mismo puede usarse como un cátodo o un ánodo de una descarga de arco ionizante. Esta última característica se proporciona en los procedimientos de deposición por arco catódico de vacío o en varios procedimientos de evaporación térmica y haz de electrones realizados con plasma de arco.

20 La deposición de un recubrimiento reaccionado como CrN se puede lograr mediante varias técnicas de deposición de vapor físico, tales como la deposición por arco catódico, la deposición por arco filtrado, la evaporación por haz de electrones y las técnicas de deposición por pulverización catódica. La tecnología de deposición de vapor físico por haz de electrones (EBPVD), tanto la convencional como la ionizada, se ha usado en muchas aplicaciones, pero, en general, 25 no se la considera como una tecnología de fabricación viable en muchos campos debido a los problemas de procesamiento por lotes, las dificultades de escalamiento hasta lograr una distribución de recubrimiento uniforme en grades sustratos y debido a que la dificultad del control de la composición de recubrimiento de elementos múltiples por la destilación de los elementos impulsada termodinámicamente con diferentes presiones de vapor. En cambio, la PVD basada en la pulverización catódica con magnetrón (MS) se usa para una amplia variedad de aplicaciones debido a la alta uniformidad de recubrimientos con magnetrón a velocidades de deposición aceptables, el control preciso de 30 la composición del recubrimiento con elementos múltiples y la capacidad del procedimiento MS de integrarse fácilmente en sistemas de recubrimiento por lote industrial completamente automatizado. Los procedimientos de deposición de vapor físico por haz de electrones realizada con un arco catódico y uno anódico (EBPVD), llamados cátodo evaporado en caliente (HEC) y ánodo evaporado en caliente (HEA) respectivamente, han demostrado un 35 aumento en la velocidad de ionización, pero sufren de inestabilidades de puntos de arco y una distribución no uniforme de la velocidad de ionización a través del flujo de vapor de metal EBPVD. En estos procedimientos, la descarga de arco se acopla con el procedimiento de evaporación, por lo que es difícil proporcionar un control independiente de las velocidades de ionización y de evaporación en los procedimientos de HEA y HEC. Por lo tanto, es extremadamente difícil integrar los procedimientos de PA-EBPVD en sistemas de recubrimiento por lotes industriales y totalmente 40 automatizados.

Las técnicas de pulverización catódica son bien conocidas en la técnica como capaces de depositar, de manera rentable, recubrimientos gruesos y reaccionados, aunque las películas de más de un micrón tienden a desarrollar turbidez debido a la cristalización. El fenómeno de cristalización o el crecimiento de la película columnar se asocia con 45 la baja energía inherente de depositar átomos en técnicas de deposición por pulverización catódica, creando así una oportunidad para las estructuras de cristal energéticamente favorecidas. Estas estructuras de cristal pueden tener propiedades anisotrópicas no deseadas específicas para las aplicaciones de uso y cosmética. En la última década, se han desarrollado varias estrategias para realzar la velocidad de ionización en los procedimientos de pulverización catódica con magnetrón. La diana principal de estas estrategias es aumentar la densidad de electrones a lo largo del 50 paso del flujo de átomos de pulverización catódica con magnetrón, aumentando así la ionización de los átomos de metal mediante el incremento de la frecuencia de las colisiones de electrones y átomos. El procedimiento de pulverización catódica con magnetrón con impulso de alta energía (HIPIMS) usa pulsos de alta energía aplicada a la diana magnetrónica simultáneamente con energía de CC para aumentar la emisión de electrones y, por tanto, aumenta la velocidad de ionización del flujo de pulverización catódica del metal. Este procedimiento demuestra propiedades de 55 recubrimiento mejoradas en la deposición de recubrimientos resistentes al desgaste de nitruro para herramientas de corte. En el procedimiento HIPIMS, la ionización mejorada se logra sólo durante tiempos de pulso cortos, mientras que, durante las pausas, la velocidad de ionización es baja, como en los procedimientos de MS convencionales con CC. Como los parámetros de pulso se acoplan con los parámetros del procedimiento de pulverización catódica con magnetrón en el procedimiento HIPIMS, la velocidad de pulverización catódica, que se halla que es casi tres veces 60 más baja que aquella del procedimiento MS convencional con CC, puede resultar afectada de manera adversa. Por

otra parte, los pulsos de alto voltaje en el procedimiento HIPIMS pueden inducir la formación de arcos en las dianas magnetrónicas, lo que resulta en la contaminación de las películas en crecimiento.

A fin de generar una descarga altamente ionizada en la proximidad de las dianas magnetrónicas, se puede añadir una fuente de plasma acoplada inductivamente (ICP) en la región entre el cátodo y el sustrato. Una bobina de inducción no resonante se coloca, a continuación, en paralelo al cátodo y es esencialmente un aparato MS convencional con CC, inmerso o adyacente al plasma. La bobina de inducción se acciona generalmente a 13,56 MHz usando un suministro de energía de RF de 50 Ω a través de una red de emparejamiento capacitiva. La energía de RF a menudo se acopla al plasma a través de una pared o una ventana dieléctrica. Las descargas acopladas de manera inductiva se operan comúnmente en la presión oscilan de 1 a 50 mTorr y la energía aplicada oscila de 200 a 1000 W, lo que resulta en una densidad de electrones en el intervalo de 10^{16} - 10^{18} m^{-3} , que generalmente se halla que aumenta linealmente al incrementar la energía aplicada. En una descarga de pulverización catódica con magnetrón, los átomos metálicos se pulverizan de la diana catódica usando energía de CC o RF. Los átomos de metal transitan el plasma denso, creado por la bobina de RF, donde son ionizados. Una bobina inductiva enfriada con agua, que se coloca entre la diana magnetrónica y los sustratos a recubrir, afecta de manera adversa el flujo de la pulverización catódica del metal. Por lo tanto, la configuración de MS es mucho más complicada, costosa y difícil de integrar al recubrimiento por lotes existente y al sistema de recubrimiento en línea. Estas desventajas también son ciertas para el procedimiento de pulverización catódica con magnetrón asistido por microondas (MW-MS). En el procedimiento de MW-MS, el diseño de la cámara de procesamiento de vacío debe rediseñarse a fin de permitir que el flujo de pulverización catódica de metal cruce una zona de ionización. Sin embargo, las estrategias de RF, MW e ICP para la ionización del procedimiento de PVD experimentan dificultades con la uniformidad de distribución de plasma sobre una gran área de procesamiento, lo que es un obstáculo para la integración en sistemas de deposición de recubrimiento de grandes áreas.

Otra técnica de la técnica anterior para la producción de iones energéticos es la pulverización catódica con magnetrón realzada (PEMS) que tiene un cátodo de filamentos calientes termoiónicos (HF-MS) o un cátodo hueco (HC-MS) como una fuente de electrones ionizados para aumentar la velocidad de ionización en el procedimiento de MC con CC. En el procedimiento HF-MS, un cátodo de filamento termoiónico distante se usa como una fuente de electrones ionizantes, lo que hace que este procedimiento sea similar al procedimiento HC-MS. Sin embargo, este procedimiento típicamente exhibe la falta de uniformidad del plasma y es difícil de integrar en los sistemas de recubrimiento de grandes áreas industriales. Por otra parte, ambos filamentos calientes y cátodos de arco huecos son sensibles y se degradan rápidamente en la atmósfera de plasma reactivo. Las desventajas de estos procedimientos de generación de plasma se superan mediante la utilización de un cátodo de arco de vacío evaporativo como una fuente de electrones para la ionización y activación de un entorno de procesamiento de deposición de vapor. El documento de los EE.UU.- A-4,155,825 describe un aparato de triodo de pulverización catódica que tiene un cátodo termoiónico que emite electrones, los cuales pasarán por la superficie de una diana iónica hacia un colector de electrones (ánodo) al otro lado de la superficie diana. A medida que la corriente de electrones pasa por encima de la diana, se produce la pulverización catódica y los iones son liberados.

La apariencia estética de las películas depositadas de arco catódico incluye partículas de un materia la diana no reaccionado llamado macros, el cual da la película depositada con defectos indeseables en aplicaciones que requieren propiedades de estéticas, de desgaste y corrosión específicas. Sin embargo, las películas depositadas no tienen un carácter cristalino, a diferencia de las películas de pulverización catódica, porque el procedimiento de evaporación de arco produce un plasma altamente ionizado con una alta energía para depositar los átomos, que se cree que aleatoriza de manera efectiva las estructuras de cristal en la película en desarrollo.

En consecuencia, hay una necesidad de técnicas adicionales de producción de partículas energéticas en los procedimientos de recubrimiento para producir propiedades de película mejoradas.

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención resuelve uno o más problemas de la técnica anterior proporcionando un sistema para el tratamiento con plasma y el recubrimiento de vacío, como se define en la reivindicación 1. Un sistema de tratamiento con plasma y recubrimiento de vacío incluye un conjunto de plasma que mira a un sustrato que tiene un cátodo magnetrónico con un borde largo, un borde corto y un polo magnético. El polo magnético resulta en un circuito de pulverización catódica en una superficie diana y una barrera electromagnética. Un ánodo se conecta eléctricamente al cátodo magnetrónico. Al menos una descarga de arco remoto se genera por separado desde el cátodo magnetrónico y en estrecha proximidad al cátodo, de modo tal que queda confinada dentro de un volumen adyacente a la diana magnetrónica. La descarga de arco remoto se extiende en paralelo al borde largo de la diana magnetrónica y se define por la superficie de la diana en un lado y la barrera electromagnética en todos los otros lados. Hay una campana de cátodo y una de ánodo, de la descarga de arco remoto, que se extiende sobre la descarga de arco y por el borde corto

del cátodo magnetrónico. Fuera del conjunto de plasma hay un sistema magnético que crea líneas de campo magnético que se extienden dentro y confinan el plasma en frente del conjunto del plasma y el sustrato. Un suministro de energía del cátodo magnetrónico se conecta al cátodo magnetrónico y al ánodo, y un suministro de energía de descarga de arco remoto se conecta entre al menos dos electrodos de descarga de arco remoto.

5

La reivindicación 9 define un sistema en línea modular que comprende un conjunto de sistemas de tratamiento con plasma y recubrimiento de vacío según la reivindicación 1.

Se proporciona un procedimiento para recubrir un sustrato en el sistema de recubrimiento expuesto anteriormente, como se define en la reivindicación 18. El procedimiento incluye una etapa de alimentar un cátodo y alimentar una descarga de arco. Se alimenta una bobina magnética y el gas fluye en una cámara de vacío. El gas es bombeado desde la cámara de vacío mientras un recubrimiento se deposita sobre un sustrato.

10

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

15

Las realizaciones ejemplares, incluyendo las realizaciones de la presente invención, se entenderán de manera más completa a partir de la descripción detallada y los dibujos adjuntos, donde:

20

la Figura 1A es una vista lateral idealizada de un sistema de recubrimiento usando un plasma de descarga de arco remoto;

la Figura 1B es una vista frontal del sistema de recubrimiento perpendicular a la vista de la Figura 1A;

25

la Figura 1C es una vista esquemática del sistema de recubrimiento de la Figura 1A;

la Figura 1D es una ilustración esquemática que muestra el confinamiento del chorro de plasma que corre entre el cátodo y el ánodo remoto;

30

la Figura 1E es un esquema de un cátodo de elementos múltiples usado para agrandar un chorro de plasma;

la Figura 2 proporciona una distribución típica del potencial de plasma entre la pantalla y el ánodo remoto obtenido mediante el modelado del elemento finito;

35

La Figura 3 proporciona la intensidad de la radiación emitida por átomos de argón excitados (línea espectral ArI 739,79 nm) desde el plasma de descarga de arco remoto contra la corriente de descarga;

40

la Figura 4A proporciona una vista esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene ánodos remotos adicionales posicionados entre la fuente de pulverización catódica con magnetrón con conjuntos de cámara catódicas protegidos adicionados para asegurar la uniformidad y la alta ionización del entorno de plasma gaseoso;

la Figura 4B proporciona una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que incluye resistencias variables instaladas entre un ánodo maestro y cada uno de una pluralidad de ánodos de esclavos;

45

la Figura 4C proporciona un ajuste en el que se usa una resistencia en paralelo con un condensador para configurar los potenciales del voltaje del ánodo intermedio;

la Figura 5 proporciona una ilustración esquemática de una configuración modular en línea de un sistema de pulverización catódica con magnetrón asistida por arco remoto (RAAMS);

50

la Figura 6 proporciona un diagrama de la distribución de potencial en el procesamiento del plasma RAD;

las Figuras 7A y 7B proporcionan una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento por lotes con una cámara catódica protegida y ubicada de manera central;

55

la Figura 8A es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;

la Figura 8B es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;

60

la Figura 8C es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;

- la Figura 8D es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;
- la Figura 8E es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;
- 5 la Figura 8F es una ilustración esquemática de una variación del sistema de las Figuras 7A y 7B;
- la Figura 8G es una ilustración esquemática que proporciona los contornos magnéticos para los sistemas de las Figuras 8A-8C;
- 10 la Figura 8H es una ilustración esquemática que proporciona los contornos magnéticos para los sistemas de las Figuras 8A-8C;
- la Figura 9A es una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene magnetrones adicionales;
- 15 la Figura 9B es una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene magnetrones adicionales;
- la Figura 9C es una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene magnetrones adicionales;
- 20 la Figura 9D es una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene magnetrones adicionales;
- la Figura 9E es una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene magnetrones adicionales;
- la Figura 10 proporciona una descripción esquemática de los procedimientos físicos implicados en la descarga de arco remoto bidireccional;
- 25 la Figura 11 proporciona una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento por lotes con un conjunto de cámara catódica protegido y ubicado de manera periférica;
- la Figura 12 es una ilustración esquemática de una variación adicional que tiene una fuente de emisión de electrones de arco catódico protegido, ubicada en el centro de la cámara de recubrimiento;
- 30 la Figura 13 proporciona ilustraciones esquemáticas de un sistema que incorpora una fuente de cátodo frío de arco de vacío para la emisión de electrones;
- 35 la Figura 14A proporciona una ilustración esquemática de una variación de un sistema de recubrimiento que incorpora un filtro de macropartículas;
- la Figura 14B proporciona una ilustración esquemática de una variación de un sistema de recubrimiento que incorpora un filtro de macropartículas;
- 40 la Figura 14C proporciona una ilustración esquemática de una variación de un sistema de recubrimiento que incorpora un filtro de macropartículas;
- la Figura 15A es una vista lateral esquemática del sistema RAAMS;
- 45 la Figura 15B es una vista lateral esquemática perpendicular a la vista de la Figura 15A;
- la Figura 16 es una ilustración esquemática de una variación de las Figuras 15A y 15B con un cátodo en uno de los compartimentos de la cámara del cátodo y con dos puntos de arco catódico;
- 50 la Figura 17 es una ilustración esquemática de una configuración alternativa del sistema de plasma remoto que usa un diseño de cámara de recubrimiento por lotes coaxial con fuentes magnetrónicas planas;
- la Figura 18A proporciona una ilustración esquemática de un ajuste con cámaras del cátodo principal separadas para cada fuente de pulverización catódica con magnetrón;
- 55 la Figura 18B proporciona una ilustración esquemática de un ajuste con cámaras del cátodo principal separadas para cada fuente de pulverización catódica con magnetrón;
- 60 la Figura 19A proporciona una ilustración esquemática de una variación avanzada de los sistemas de las Figuras

14-18.

la Figura 19B es una ilustración esquemática de una variación del sistema de la Figura 19A;

5 la Figura 19C es una ilustración esquemática de una variación del sistema de la Figura 19A;

la Figura 19D proporciona una vista en perspectiva del módulo RAAMS con una cuadrícula de electrodos;

10 la Figura 19E proporciona un esquema de un sistema de otro sistema de recubrimiento de ánodo remoto;

la Figura 19F es una vista transversal del sistema que se muestra en la Figura 19E;

15 la Figura 20 proporciona una ilustración esquemática de una variación en la que la fuente de arco catódico para la emisión de electrones con un cátodo que no se consume

la Figura 21A proporciona una vista esquemática en la que un soporte de sustratos se posiciona entre una fuente de pulverización catódica con magnetrón y un ánodo;

20 la Figura 21B proporciona una vista esquemática en la que un ánodo de hilo se posiciona entre un soporte de sustratos y una fuente de pulverización catódica con magnetrón;

la Figura 22A es una sección transversal del sistema mostrado con las bobinas magnéticas para el confinamiento;

25 la Figura 22B es una sección transversal del sistema que se muestra con las bobinas magnéticas para el confinamiento y con un cátodo de magnetrón que mira a otro cátodo magnetrónico donde cada polaridad refleja la polaridad del otro cátodo;

30 la Figura 22C es una sección transversal del sistema que se muestra con las bobinas magnéticas para el confinamiento y con un cátodo de magnetrón que mira a otro cátodo magnetrónico donde cada polaridad es la opuesta a la polaridad del otro cátodo;

la Figura 22D es una vista lateral transversal del sistema que se muestra en la Figura 22A con un suministro de energía de CC para el cátodo;

35 la Figura 22E es una vista transversal que muestra un ánodo de hilo posicionado a lo largo de las líneas del campo magnético que emana desde la bobina;

la Figura 22F es una vista lateral transversal del sistema que se muestra en la Figura 22A con un suministro de energía de RF para el cátodo;

40 la Figura 22G es una vista lateral transversal del sistema que se muestra en la Figura 22A con un suministro de energía de pulso de CC para el cátodo;

45 la Figura 23 es una vista prospectiva de las bobinas de confinamiento de espejo magnético y el plasma de arco remoto adyacente a la diana y al cátodo;

la Figura 24A es una vista transversal que muestra múltiples conjuntos de recubrimiento que miran a conjuntos de recubrimiento con el sustrato en el medio;

50 la Figura 24B es una sección transversal de múltiples conjuntos de recubrimiento que miran a conjuntos de recubrimiento con el sustrato en el medio e incluyendo el ánodo de hilo de la Figura 22;

la Figura 24C muestra líneas del campo magnético modelado, donde la polaridad del campo magnético se refleja en el lado opuesto de un sistema en línea.

55 la Figura 24D muestra líneas del campo magnético modelado donde la polaridad del campo magnético se refleja en el lado opuesto de un sistema en línea y la corriente de la bobina magnética es superior a la de la figura 24C.

60 la Figura 24E muestra líneas del campo magnético modelado, donde la polaridad del campo magnético se refleja en el lado opuesto de un sistema en línea y ninguna corriente de bobina magnética.

- la Figura 25A es una sección transversal longitudinal que muestra dos descargas de chorro de arco remoto.
- 5 la Figura 25B es una sección transversal longitudinal donde la campana del cátodo penetra la porción corta del cátodo magnetrónico;
- la Figura 25C es una sección transversal que muestra el confinamiento de los chorros de plasma remotos dentro de la descarga de magnetrón;
- 10 la Figura 25D es una sección transversal que muestra el confinamiento de los chorros de plasma remotos dentro de la descarga de magnetrón generada desde las bobinas electromagnéticas;
- la Figura 25E es una sección transversal que muestra el confinamiento de los chorros de plasma remotos dentro de la descarga de magnetrón generada desde las bobinas electromagnéticas orientadas en sentido contrario al lado trasero de la diana;
- 15 la Figura 25F es una vista prospectiva del conjunto de recubrimiento que usa cuatro bobinas electromagnéticas para crear cuatro pistas de enfriamiento en una diana;
- 20 la Figura 25G es una sección transversal que muestra el confinamiento de los chorros de plasma remotos dentro de la descarga de magnetrón generada por las bobinas electromagnéticas;
- la Figura 25H es una vista lateral transversal que muestra el electrodo del arco principal en la descarga de magnetrón generada por un imán permanente con forma de yugo;
- 25 la Figura 25I es una vista lateral transversal que muestra el electrodo del arco principal posicionado en la descarga de magnetrón generada por imán permanente con forma de yugo y una diana pulverizada de una lámina móvil y fina;
- 30 la Figura 25J es una sección transversal que muestra la diana pulverizado en la forma de un disco con descargas de arcos remotos en paralelo;
- la Figura 25K es una sección transversal longitudinal que muestra una variación donde la campana del cátodo penetra la porción corta del cátodo magnetrónico con una bobina electromagnética que rodea al cátodo;
- 35 la Figura 25L es una vista esquemática de una configuración en línea de la RAAMS con realce electromagnético;
- la Figura 25M es una vista esquemática de un refinamiento de la cámara en línea de RAAMS con realce electromagnético con magnetrones rotatorios;
- 40 la Figura 26A es una sección transversal longitudinal que muestra los electrodos del arco principal posicionados en la descarga de magnetrón;
- 45 la Figura 26B es una vista lateral transversal que muestra el electrodo del arco principal posicionado en la descarga de magnetrón;
- la Figura 26C es una vista prospectiva del conjunto de recubrimiento con el cátodo de varilla principal y el ánodo de varilla principal posicionado en la porción corta de la descarga de magnetrón;
- 50 la Figura 26D es una vista prospectiva del conjunto de recubrimiento con los electrodos de varilla posicionados en la porción corta de la descarga de magnetrón;
- la Figura 26E es una vista prospectiva donde la descarga de arco principal se genera mediante un propulsor de chorro de arco posicionado de manera adyacente a la porción corta del circuito magnetrónico.
- 55 la Figura 26F es una vista prospectiva del conjunto del cátodo con los electrodos de varilla en extremos opuestos de la porción corta de la descarga de magnetrón y un suministro de energía de CC pulsada para los electrodos de varilla;
- 60 la Figura 26G es una vista prospectiva del conjunto del cátodo con los electrodos de varilla en extremos opuestos

de la porción corta de la descarga de magnetrón y un suministro de energía de RF para los electrodos de varilla;

5 la Figura 27A es un gráfico de la intensidad de los espectros de Cr en el plasma frente a la corriente de descarga de arco, con y sin los conjuntos de recubrimiento opuestos de las Figuras 22B y 22C, y sin corriente en las bobinas de confinamiento;

la Figura 27B es un gráfico de la intensidad de la Ar excitado y átomos de nitrógeno en una mezcla de gas de Ar/N₂ contra la corriente de descarga de arco;

10 la Figura 28A es una ilustración esquemática de un monitor de plasma usado para la medición de la intensidad de cromo de la Figura 27.

15 la Figura 28B es un gráfico de la intensidad del espectro de Cr en el plasma contra la corriente de ánodo remoto, con y sin los conjuntos de recubrimiento opuestos de las Figuras 22B y 22C y sin la corriente en las bobinas de confinamiento;

la Figura 29A es una ilustración esquemática de un sustrato con un recubrimiento hecho por un procedimiento asistido por plasma de descarga de arco remoto; y

20 la Figura 29B es una ilustración esquemática de un sustrato con un recubrimiento de capas múltiples hecho por un procedimiento asistido por plasma de descarga de arco remoto.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

25 Ahora se hará referencia en detalle a las composiciones, realizaciones y procedimientos actualmente preferidos, incluyendo las composiciones, realizaciones y procedimientos de la presente invención, las cuales constituyen los mejores modos de practicar la invención actualmente conocida para los inventores. Las Figuras no necesariamente son a escala. Sin embargo, debe entenderse que las realizaciones descritas son solo ejemplos de la invención que
30 invención no deben interpretarse como limitantes, sino solo como una base representativa para cualquier aspecto de la invención y/o como una base representativa para enseñar al experto en la técnica cómo emplear de maneras diversas la presente invención.

Salvo en los ejemplos, o donde se indique de otro modo lo contrario, todas las cantidades numéricas en esta
35 descripción que indican cantidades de material o condiciones de reacción y/o uso deben entenderse como modificadas por la palabra "alrededor" al describir el alcance más amplio de la invención. En términos generales, se prefiere la práctica dentro de los límites numéricos establecidos. También, a menos que se indique expresamente lo contrario: por ciento, "partes de" y valores de proporción son en peso; la descripción de un grupo o clase de materiales como
40 adecuados o preferidos para un fin dado en conexión con la invención implica que las mezclas de cualquiera de dos o más de los miembros del grupo o clase son igualmente adecuados o preferidos; la descripción de los constituyentes en términos químicos se refiere a los constituyentes al momento de la adición a cualquier combinación especificada en la descripción, y no necesariamente impide interacciones químicas entre los constituyentes de una mezcla una vez
45 mezclada; la primera definición de un acrónimo u otra abreviatura se aplica a todos los usos posteriores en esta invención de la misma abreviatura y se aplica *mutatis mutandis* a las variaciones gramaticales normales de la abreviatura inicialmente definida; y, a menos que se indique expresamente lo contrario, la medición de una propiedad se determina mediante la misma técnica a la que se hizo referencia antes o se hará referencia después para la misma propiedad.

También debe entenderse que esta invención no se limita a las realizaciones y procedimientos específicos descritos
50 a continuación, ya que los componentes y/o las condiciones específicas puede variar, por supuesto. Además, la terminología usada en esta invención solo se usa con el fin de describir las realizaciones particulares de la presente invención y no se pretende que sea limitante de manera alguna.

También cabe señalar que, como se usa en la memoria descriptiva y las reivindicaciones adjuntas, la forma singular
55 "un(a)" y "el(la)" comprenden referentes plurales, a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Por ejemplo, se pretende que la referencia a un componente en singular comprenda una pluralidad de componentes.

Con referencia a las Figuras 1A, 1B, 1C y 1D, se proporciona un sistema de recubrimiento que usa un plasma de
60 descarga de arco remoto. La Figura 1A es una vista lateral idealizada del sistema de recubrimiento. La Figura 1B es una vista frontal perpendicular a la vista de la Figura 1A. La Figura 1C es una vista esquemática del sistema de

recubrimiento que incluye el cableado eléctrico. El sistema de esta realización es particularmente útil para el realce de plasma de arco de los procedimientos de deposición de recubrimiento por pulverización catódica con magnetrón de grandes áreas. El sistema de recubrimiento 10 incluye una cámara de vacío 12 con un conjunto de recubrimiento posicionado en la misma. El conjunto de recubrimiento incluye una fuente de vapor 16, un conjunto de cámara catódica 5 18 posicionado en la cámara de vacío 12 y un soporte de sustratos 20 para sostener los sustratos 22 a recubrir. Las Figuras 1A y 1B representan una variación en la que la fuente de vapor 16 es una fuente de pulverización catódica con magnetrón, de modo tal que el procedimiento de recubrimiento del sistema 10 es un procedimiento de pulverización catódica con magnetrón asistido por arco remoto (RAAMS). Tales fuentes de pulverización catódica con magnetrón incluyen una diana Ts, un suministro de energía Ps y un ánodo As. Se debe apreciar que, para la fuente 10 de vapor, es posible usar otros tipos de fuentes de vapor 16. Los ejemplos de tales fuentes de vapor incluyen, entre otros, evaporadores térmicos, evaporadores de haz de electrones, evaporadores de arco catódico y similares. Los sustratos 22 se posicionan en frente de la fuente de vapor 16 durante el recubrimiento y se mueven a lo largo de la dirección d1 durante la deposición del recubrimiento. En un ajuste, los sustratos se pueden introducir de manera continua a partir de una cámara de bloqueo de carga a la derecha de la cámara de vacío 12 y ser recibidos por una 15 cámara de salida a la izquierda de la cámara de vacío 12 en la Figura 1A. El conjunto de la cámara catódica 18 incluye un recinto de cátodo 24 con aberturas 26 definidas en el mismo, un cátodo de emisión de electrones 28, un ánodo principal separado opcional 34 y una protección 36. La protección 36 aísla el cátodo emisor de electrones 28 de la cámara de vacío 12. En un ajuste, un ánodo separado opcional 34, un recinto de cátodo 24, una protección 36 o una conexión a tierra operan como el ánodo acoplado al cátodo principal.

20 El conjunto de la cámara catódica 18 opera como una fuente de cátodo emisora de electrones en el contexto de la presente realización. En un ajuste, un arco principal se genera en la fuente catódica emisora de electrones entre el cátodo 28 y el ánodo principal. El recinto del cátodo 24 puede servir tanto como un ánodo principal independiente conectado al polo positivo de la fuente de energía principal 48, como un ánodo conectado a tierra, cuando se conecta 25 a tierra 34. La protección 36 define aberturas 38 para transmitir la corriente de emisión de electrones 40 desde el cátodo 28 en una cámara de vacío 12. La protección puede ser flotante o puede conectarse al polo positivo de ya sea un suministro de energía de arco principal 48 o un suministro de energía adicional (no se muestra). En otro ajuste, el cátodo 28 es un cátodo de arco catódico y el ánodo principal conectado a tierra 34 es un ánodo de arco catódico. Se puede usar cualquier número de cátodos diferentes para el cátodo emisor de electrones 28. Los ejemplos de tales 30 cátodos incluyen, entre otros, cátodos de arco de vacío frío, cátodos huecos, cátodos de filamentos termioiónicos y similares, así como también combinaciones de los mismos. Típicamente, la diana catódica se hace con un metal que tiene una capacidad de gettering que incluye aleaciones de titanio y circonio. En un ajuste, la protección de la cámara catódica se enfría con agua y se polariza negativamente en relación con la diana catódica donde el potencial de polarización de la protección oscila de -50 a -1000 V. En incluso otro ajuste, el conjunto de la cámara catódica 18 35 incluye una matriz catódica que tiene una pluralidad de dianas catódicas instalados en la misma, siendo la altura de la matriz de la diana catódica sustancialmente la misma que la altura del ánodo remoto y la altura de un área de deposición. La separación de la parte superior del conjunto de la cámara catódica o la fuente de vapor 16 a los sustratos 22 (es decir, la parte superior de los sustratos) es tal que el plasma que fluye del cátodo 28 al ánodo remoto 44 está confinada. Típicamente, la distancia de separación desde la protección 36 de la cámara catódica o desde la 40 superficie de evaporación de la fuente de vapor 16 o desde el ánodo remoto 44 a los sustratos 22 es de alrededor de 2 a alrededor de 20 pulgadas (desde alrededor de 5,08 a alrededor de 50,8 cm), lo que resulta en una formación de un tramo estrecho para el confinamiento del plasma de arco remoto entre el cátodo 28 en una cámara catódica 18 y el ánodo remoto 44. Cuando el ancho de este tramo es menor a 2 pulgadas (5,08 cm), crea una alta impedancia en el plasma, lo que conduce a inestabilidades del plasma y, finalmente, la extinción de la descarga de arco remoto. Cuando 45 el ancho de este tramo es mayor a 20 pulgadas (50,8 cm), la densidad del plasma en la descarga de arco remoto no aumenta lo suficiente como para ionizar el flujo de pulverización catódica del metal. En un ajuste particularmente útil, una diana catódica de gran área que tiene una forma de placa o barra se instala en el conjunto de la cámara catódica 18. Típicamente, una diana catódica de un área tan grande tiene una altura que es sustancialmente igual a la altura del ánodo y la altura de un área de deposición. En un ajuste, la diana catódica se puede hacer del metal que tiene una 50 capacidad de gettering tal como, por ejemplo, de aleación de titanio o circonio. En este caso, la fuente emisora de electrones del cátodo protegido también puede servir como una bomba de gettering de vacío que puede mejorar la eficiencia de bombeo del sistema de recubrimiento. Para mejorar aún más la eficiencia de bombeo de gettering, la protección 36 que mira a la superficie de evaporación de la diana catódica 28 en la cámara catódica 18 puede enfriarse con agua y, opcionalmente, conectarse al suministro de energía de polarización de alto voltaje. Cuando la protección 55 enfriada con agua 36 se polariza para un potencial negativo alto que oscila de -50 a -1000 V en relación con la diana catódica 28, estará sujeta a un bombardeo iónico intenso por parte de los iones metálicos generados por el procedimiento de evaporación de arco catódico. La condensación del vapor de metal bajo condiciones de bombardeo iónico intenso es favorable para el bombeo de gases nobles como He, Ar, Ne, Xe, Kr, así como también hidrógeno.

60 El sistema 10 también incluye un ánodo remoto 44 acoplado eléctricamente al cátodo 28, un suministro de energía

principal 48 conectado entre el cátodo 28 y el ánodo acoplado al cátodo principal. El ánodo remoto 44 se posiciona en la cámara de vacío 12 de modo tal que la fuente de vapor 16 quede posicionada entre el conjunto de la cámara catódica 18 y el ánodo remoto. En un ajuste, una pluralidad de fuentes de vapor se posiciona entre el conjunto de la cámara catódica 18 y el ánodo remoto 44, como se expone a continuación con más detalles. El sistema 10 también incluye un suministro de energía secundario 52 que acopla eléctricamente el cátodo 28 al ánodo remoto 44. El filtro de paso bajo 54 también se representa en la Figura 1C, que incluye la resistencia R y el condensador C. Típicamente, la fuente de vapor 16 se posiciona entre el conjunto de la cámara del cátodo 18 y el ánodo remoto 44. El sistema 10 incluye además el sistema de bombeo 56 para mantener una presión reducida y un sistema de gas 58 para introducir uno o más gases (por ejemplo, argón, nitrógeno, helio, etc.) en la cámara de deposición 12. En un refinamiento, la fuente de energía secundaria 52, que alimenta la descarga del arco distante en la cámara de recubrimiento 12 se instala entre el conjunto de la cámara del cátodo 18 y el ánodo remoto 44 y proporciona al menos un 20 % de voltaje de circuito abierto superior al suministro de energía principal 48.

Incluso con referencia a las Figuras 1A, 1B, 1C y 1D, un arco principal se inicia mediante un encendedor de arco 60 en una cámara catódica 24 aislada desde la cámara de descarga con la protección 36 con las aberturas 38 para la transmisión de la corriente de electrones 40. Típicamente, el potencial del plasma cerca de la pantalla es bajo, cerca del potencial del plasma en el conjunto de la cámara catódica 18, mientras que, en el plasma de descarga de arco remoto, el potencial eléctrico es alto, cerca del potencial eléctrico del ánodo remoto 44. La Figura 2 proporciona una distribución típica del potencial de plasma entre la pantalla y el ánodo remoto obtenido mediante el modelado del elemento finito. Sorprendentemente, se ha descubierto que el presente sistema de recubrimiento produce un arco de plasma confinado que corre desde el conjunto de la cámara del cátodo 18 al ánodo remoto 44. La Figura 1D proporciona una ilustración esquemática que muestra el movimiento de la densidad de plasma entre el ánodo remoto 44 y el cátodo 28. Un plasma confinado (es decir, un chorro de plasma) corre entre el ánodo remoto y el cátodo a través de la región de recubrimiento. Los extremos del plasma confinado se mueven a lo largo de la dirección d4, como se expuso en la Figura 1D. Un punto de arco 66 se forma en el cátodo 28 junto con la zona de erosión 68. El campo de plasma 62 en el ánodo remoto 44 y el campo de plasma 64 en el cátodo 28 están confinados, en términos de dimensiones, en un espacio de alrededor de 1 a 5 pulgadas (de alrededor de 2,54 a 12,7 cm) a lo largo de la dirección d4. En un ajuste, los campos magnéticos se usan para lograr el movimiento de barrido a lo largo de d4. En otro ajuste, este movimiento de barrido se logra moviendo mecánicamente el cátodo 28 largo de la dirección d4. En incluso otros ajustes, un cátodo de bombardeo de filamentos de emisión con electrones se mueve a lo largo de d4. En incluso otros ajustes, como se muestra en la Figura 1E, el cátodo incluye una pluralidad de elementos de cátodo 28¹⁻⁶ que se activan de manera secuencial a fin de formar un chorro de plasma que se mueve a lo largo de d4. El confinamiento del arco de plasma resulta en una alta densidad y un chorro de plasma caliente que conecta puntos de arco catódico en el cátodo principal con un área asociada en el ánodo remoto que corre a través de un tramo relativamente estrecho creado entre las paredes de la cámara (con cátodos principales, ánodos y magnetrones unidos) y el soporte de sustratos. Esto resulta en una alta densidad de corriente en el chorro de plasma en movimiento que conecta el cátodo y el ánodo remoto. En un ajuste, la densidad de corriente en el plasma RAAMS dentro de este tramo estrecho es de 0,1 mA/cm² hasta 100 A/cm². Típicamente, la densidad de los electrones n_e en el plasma de arco remoto de fondo oscila de alrededor de $n_e \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ a alrededor de $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, mientras que, dentro del área del chorro de plasma de arco confinado, la densidad de los electrones oscila desde alrededor de $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ a alrededor de $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. El confinamiento que crea el chorro de plasma es el resultado de las relaciones dimensionales físicas entre los componentes, como se expone a continuación, así como también de la aplicación de campos magnéticos. En particular, la descarga opera a un potencial de plasma muy alto, que corresponde a una alta energía de bombardeo iónico (es decir, la energía de bombardeo de iones es la diferencia entre el potencial de plasma (contra la conexión a tierra) y el potencial de polarización del sustrato (contra la conexión a tierra)). Incluso en sustratos flotantes y conectados a tierra, los iones con 50 a 70 eV se obtienen debido a que el potencial del plasma está por encima de 50 V. En un ajuste, el potencial del plasma es de 5 a 500 V.

Con referencia a las Figuras 1A y 1B, se proporciona un aspecto del dimensionamiento relativo de varios componentes del sistema de recubrimiento 10. El ánodo remoto 44 tiene una dimensión de ánodo remoto lineal D_a . La fuente de vapor 16 tiene una dimensión de fuente de vapor lineal D_v . La diana catódica Ts tiene una dimensión de diana catódica lineal D_c . El soporte de sustratos 20 tiene una dimensión de soporte lineal D_h . En un ajuste, la dimensión del ánodo remoto lineal D_a , la dimensión de la fuente de vapor lineal D_v , la dimensión de la diana catódica lineal D_c y la dimensión del soporte lineal D_h son paralelas entre sí. En otro ajuste, la dimensión del ánodo lineal remoto D_a es mayor que o igual que la dimensión de la fuente de vapor lineal D_v , que es mayor que o igual a la dimensión de la diana catódica lineal D_c , que es mayor que o igual a la dimensión del soporte lineal D_h .

En una variación de la presente realización, varios ánodos remotos se asocian con (es decir, se acoplan eléctricamente a) al menos un cátodo de arco posicionado en el conjunto de cámara catódica protegido 18. Los ánodos remotos se posicionan en posiciones estratégicas dentro de la cámara de recubrimiento.

En otra variación, las distancias perpendiculares entre cada una de las fuentes de vapor (por ejemplo, la fuente de vapor 16) y los sustratos 22 a recubrir es sustancialmente igual. Por otra parte, en otro ajuste adicional, la distancia entre el cátodo 28 y el ánodo remoto 44 es menor que la distancia en la que se produce la degradación cuando un voltaje aplicado de un suministro de energía secundaria 52 supera de 1,2 a 30 veces el voltaje aplicado del suministro de energía principal 48.

En incluso otro ajuste de la presente realización, las sondas de plasma se instalan entre el cátodo 28 y el ánodo remoto 44 para medir la densidad de plasma. Tales mediciones proporcionan una retroalimentación, de modo tal que el segundo suministro de energía 52 se ajusta para proporcionar el ajuste de una corriente de ánodo remoto a un ánodo remoto 44 para obtener una distribución uniforme de la densidad del plasma entre el conjunto de la cámara catódica 18 y el ánodo remoto 44.

El modelado de plasma de arco remoto de la presente realización se caracteriza mediante la distribución potencial eléctrica entre el conjunto de cámara catódica 18 el ánodo remoto 44 y mediante la densidad del plasma en el plasma de descarga de arco remoto. El potencial del plasma en el plasma de descarga de arco remoto y el potencial del ánodo se incrementan a medida que aumenta la corriente de descarga remota. La densidad de plasma en el plasma de descarga de arco remoto aumenta de manera casi proporcional a la corriente de descarga. Este resultado se verifica mediante espectroscopía de emisión óptica del plasma de descarga de arco remoto. La Figura 3 muestra la intensidad de la radiación emitida por átomos de argón excitados (línea espectral ArI 739,79 nm) desde el plasma de descarga de arco remoto contra la corriente de descarga. Se puede observar que la intensidad de la emisión de luz de los átomos de argón excitados mediante el impacto directo de electrones es casi proporcional a la corriente de descarga. Este fenómeno se explica por la relación directamente proporcional entre la concentración de electrones en el plasma de arco remoto y la corriente de descarga de arco remoto. La concentración de iones en la descarga de arco remoto es casi igual a la concentración de electrones, de modo tal que se mantiene la cuasi neutralidad del plasma.

Con referencia a las Figuras 4A, 4B y 4C, se proporcionan variaciones de la presente realización con una cadena de fuentes de pulverización catódica con magnetrón instalada en línea entre un conjunto de cámara catódica protegido en un lado y un ánodo de arco distante en el otro lado. En este contexto, el término "en línea" significa que los componentes están linealmente dispuestos de modo tal que el sustrato puede pasar sobre los componentes mientras se mueve en una dirección lineal. La Figura 4A proporciona una vista esquemática de un sistema de recubrimiento que tiene ánodos remotos adicionales posicionados entre la fuente de pulverización catódica con magnetrón con conjuntos de cámara catódicas protegidos adicionales para asegurar la uniformidad y la alta ionización del entorno de plasma gaseoso. El sistema de deposición 70 incluye una cámara de vacío 72 con sistemas de suministro de vacío y gas asociados, como se expuso anteriormente. El sistema de deposición 70 también incluye fuentes de vapor 76 y 78, los conjuntos de cámara catódica 80 y 82, y el soporte de sustratos 84 para sostener los sustratos 22 a recubrir. La Figura 4A representa una variación en la que las fuentes de vapor 76, 78 son fuentes de pulverización catódica con magnetrón. Durante el recubrimiento, los sustratos se posicionan en frente de las fuentes de vapor. Típicamente, los sustratos 22 se mueven a lo largo de la dirección d1 durante la deposición del recubrimiento. Los conjuntos de cámara catódica 80 y 82, respectivamente, incluyen recintos de cátodo 90 y 92 con aberturas 94 y 96 definidas en los mismos, cátodos 98 y 100, ánodos principales opcionales 102 y 104, y protecciones 106, 108. Las protecciones 106, 108 aíslan, respectivamente, los cátodos 98, 100 de la cámara de vacío 72. Cada una de las protecciones 106, 108 define aberturas para la transmisión de las corrientes de emisión de electrones hacia dentro de la cámara de vacío 72. En un ajuste, los cátodos 98, 100 son cátodos de arco catódico y los ánodos principales 102, 104 son ánodos de arco catódico. El sistema 70 también incluye ánodos remotos 110, 112, respectivamente, acoplados eléctricamente a los cátodos 98, 100. En un ajuste como se representa en la Figura 4A, los conjuntos de cámara catódica protegidos, las fuentes de vapor (por ejemplo, las dianas magnetrónicas) y los ánodos remotos se alinean a lo largo de la línea recta que es adecuada para los sistemas de recubrimiento en línea.

La Figura 4B proporciona una ilustración esquemática de un sistema de recubrimiento que incluye resistencias variables instaladas entre un ánodo maestro y cada uno de una pluralidad de ánodos de esclavos. En este ajuste, el sistema de recubrimiento 120 incluye una cámara de vacío 122 y un conjunto de la cámara catódica 124 que es del diseño general expuesto anteriormente. El conjunto de la cámara catódica 124 incluye la cámara catódica 126, el cátodo 128, el encendedor del arco 130, la protección 132 que define una pluralidad de aberturas en la misma y un ánodo principal opcional 134. El sistema 120 también incluye una fuente de energía principal 136 que conecta el cátodo 128 y el ánodo principal 134 y las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 136, 138, 140. Cada fuente de pulverización catódica con magnetrón tiene una diana Ts, un suministro de energía Ps y un sistema de electrodos de conteo asociado 120 que también incluye un ánodo remoto 142 con un suministro de energía secundario 144 que proporciona un potencial de voltaje entre el cátodo 128 y el ánodo remoto 142. El sistema 120 también incluye ánodos esclavos 146, 148, 150, 152 que están en potenciales de voltaje intermedios establecidos por las resistencias variables

R¹, R², R³ y R⁴. En este ajuste, la densidad de la distribución del plasma puede controlarse cambiando la corriente a través de cada uno de los ánodos esclavos usando las resistencias variables R¹, R², R³ y R⁴. Las distancias entre los ánodos esclavos y la distancia entre el ánodo esclavo más cercano al ánodo maestro y el ánodo maestro no pueden ser mayores a la distancia mínima de la interrupción de descarga del plasma en una composición de gas y presión de procesamiento.

La Figura 4C proporciona un ajuste en el que se usa una resistencia en paralelo con un condensador para configurar los potenciales del voltaje del ánodo intermedio. En este ajuste, la resistencia R⁵ en paralelo con C⁵ establece el potencial de voltaje para el ánodo 146, la resistencia R⁶ en paralelo con C⁶ establece el potencial de voltaje para el ánodo 148, la resistencia R⁷ en paralelo con C⁷ establece el potencial de voltaje para el ánodo 150 y la resistencia R⁸ en paralelo con C⁸ establece el potencial de voltaje para el ánodo 152. En este ajuste, los condensadores se usan para extender el procedimiento RAAMS a lo largo de la gran distancia mediante el encendido de pulsos de descargas de arco remoto entre el cátodo en una cámara catódica y cada uno de los ánodos esclavos posicionados entre el cátodo en una cámara catódica y el ánodo maestro. Se aprecia que los ánodos esclavos también se pueden proporcionar con suministros de energía independientes adicionales; cada uno de los suministros de energía de ánodo esclavo puede instalarse entre el cátodo 128 y el ánodo esclavo correspondiente. El voltaje de circuito abierto de cada suministro de energía secundario conectado ya sea al ánodo maestro o al ánodo esclavo supera al menos 1,2 veces el voltaje del circuito abierto del suministro de energía de arco principal 136.

En incluso otra variación de la invención, una configuración modular en línea de la configuración RAAMS se proporciona en la Figura 5. Dicho sistema en línea puede incluir cualquier número de estaciones de deposición and/or estaciones de tratamiento de superficie (por ejemplo, la limpieza de plasma, de carburación de implantación de iones, nitruración, etc.). En la variación representada en la Figura 5, el sistema de recubrimiento 154 incluye los módulos 156-164 que están alineados en línea. Los módulos 156-164 están separados del módulo vecino por medio de una válvula de compuerta de bloqueo de carga 166-176. El sistema de ingeniería de superficie RAAMS modular 154 incluye el módulo 156, que es un módulo de cámara que tiene una cámara de arco catódico protegido 178 y un ánodo remoto 180 posicionado a lo largo de una pared de la cámara, como se expuso anteriormente. En esta Figura, también se muestra un conjunto opcional de bobinas magnéticas 182, 184 que crea un campo magnético longitudinal que oscila de 1 a 100 Gs a lo largo de la cámara de recubrimiento. Este módulo 156 realiza las siguientes operaciones: carga de sustratos; decapado o limpieza de iones de los sustratos mediante un bombardeo de iones de alta energía (típicamente $E > 200$ eV) en un argón con un plasma de descarga de arco de ánodo remoto (RAAD) generado entre el cátodo en una cámara catódica protegida y un ánodo remoto; y acondicionamiento de los sustratos a recubrir mediante el bombardeo suave de iones (típicamente $E < 200$ eV) en un plasma RAAD de argón generado entre el cátodo en una cámara catódica protegida y un ánodo remoto. El segundo módulo 158 nitrura iónicamente las superficies del sustrato a recubrir en un plasma de nitrógeno o una mezcla RAAD de argón y nitrógeno, generado entre el cátodo en una cámara catódica protegida y el ánodo remoto. La velocidad de la nitruración de iones con inmersión en plasma de acero 440C, M2 y HSS en el procedimiento de nitruración de iones con inmersión de plasma RAAD alcanza de 0,5 a 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ a presiones de 0,1 a 200 mTorr y una corriente de ánodo remoto que oscila de 10 a 300 A, pero típicamente está dentro del intervalo de presión de 0,2 a 100 mTorr y el intervalo de ánodo remoto de 10 a 200 A. La nitruración de iones con inmersión en plasma RAAD es un tratamiento de baja temperatura, donde la temperatura del sustrato no excede típicamente los 350 °C. En este procedimiento, los sustratos pueden ser flotantes, estar conectados a tierra o estar polarizados a voltajes de polarización negativa muy bajos (por ejemplo, por debajo de -100 V). La nitruración de iones a tales voltajes de polarización bajos se debe al alto potencial positivo del plasma RAAD que hace que los iones de plasma reciban una energía excesiva desde el alto potencial del plasma, el cual supera el potencial del sustrato conectado a tierra. De manera alternativa, una implantación de iones de energía baja de elementos tales como nitrógeno, fósforo, silicio, carbono del plasma RAAD gaseoso también se puede efectuar a voltajes de polarización del sustrato relativamente bajos, que oscilan típicamente de -200 a -1500 V. El diagrama de la distribución de potencial en el procesamiento de plasma RAAD se ilustra en la Figura 6. En un procedimiento típico de plasma RAAD, el cátodo principal tiene un potencial que oscila de -20 a -50 V con respecto al ánodo principal de conexión a tierra. En un ajuste, el potencial del sustrato flotante oscila de -10 a -50 V con respecto al cátodo principal. El potencial del sustrato polarizado en la nitruración de iones, la carburación y otros procedimientos de saturación de difusión de iones va típicamente de -10 a -200 V en relación con el cátodo principal, mientras que, en el procedimiento de implantación de iones de baja energía con inmersión en plasma RAAD, la polarización del sustrato oscila típicamente de -200 a -1500 V.

Se aprecia que el diseño de la cámara modular de la Figura 5 también se puede usar para efectuar procedimientos de CVD asistida por plasma de arco de ánodo remoto (RAACVD) en cámaras de plasma RAAD gaseoso (por ejemplo, los módulos 156, 158 y 164 en la Figura 5). Por ejemplo, esta configuración procedimiento de CVD de inmersión en plasma de baja presión se puede usar para la deposición de recubrimientos de diamante policristalino en el plasma, creando una atmósfera de gas que consiste en un 0,1 a un 1 % de metano y el resto de hidrógeno o una mezcla de

hidrógeno-argón. El plasma RAAD actúa como un potente activador de la atmósfera reactiva con alta densidad de hidrógeno atómico y radicales de HC que contribuyen a la formación de un recubrimiento de diamante policristalino. En este procedimiento, el sustrato a revestir puede conectarse a tierra, ser flotante o estar polarizado al potencial negativo, no por debajo de -100 V, en comparación con el cátodo principal. La matriz del calentador de radiación independiente se puede usar para mantener la temperatura del sustrato en el intervalo de 200 a 1.000 °C, según sea necesario para la deposición de recubrimiento de diamante policristalino en los procedimientos de CVD de baja presión realizados con plasma.

En otra realización, se proporciona un sistema de recubrimiento que tiene fuentes de plasma alineadas a lo largo de paredes curvilíneas. La Figura 7A proporciona una vista esquemática superior de un sistema de recubrimiento por lotes con una cámara catódica protegida y ubicada de manera central; La Figura 7B proporciona una vista en perspectiva esquemática del sistema de recubrimiento por lotes de la Figura 7A. El sistema de recubrimiento 190 incluye una cámara de vacío 192, la cámara catódica 194 que incluye el cátodo 196 y la protección 198. La cámara de vacío 192 tiene una sección transversal sustancialmente circular. El sistema 190 también incluye un suministro de energía principal 200 que establece el potencial de voltaje entre el cátodo 196 y el ánodo principal 202. El sistema 190 también incluye fuentes de pulverización catódica con magnetrón 204-210, cada una de las cuales incluye una diana Ts, un suministro de energía Ps y un ánodo As. En un ajuste, las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 204-210 están dispuestas a lo largo de un círculo que tiene el mismo centro que la sección transversal de la cámara de vacío 192. El sistema 190 también incluye los ánodos remotos 212 y 214 que se establecen a un potencial de voltaje con respecto al cátodo 196 mediante los suministros de energía 216 y 218. En esta realización, los sustratos 22 se mueven axialmente a lo largo de una dirección d2 circular a medida que son recubiertos. En cada una de las variaciones de las figuras 7A y 7B, el plasma corre entre el cátodo 196 y los ánodos remotos. Esta corriente queda confinada por la separación entre el ánodo remoto (o las fuentes de pulverización catódica) y los sustratos (es decir, la parte superior de los sustratos), que es típicamente de 2 a 20 pulgadas (5,08 a 50,8 cm). El confinamiento persiste a través de la zona de recubrimiento. Por otra parte, el plasma es barrido a lo largo del cátodo en una dirección perpendicular al movimiento de los sustratos, como se expuso anteriormente con respecto a la Figura 1D.

Como se expuso anteriormente, los ánodos remotos 212 y 214 tienen una dimensión de ánodo remoto lineal D_a . Las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 204-210 tienen una dimensión de fuente lineal D_s . La diana catódica 196 tiene una dimensión de diana catódica lineal D_c . El soporte de sustratos 20 tiene una dimensión de soporte lineal D_h . En un ajuste, la dimensión del ánodo remoto lineal D_a , la dimensión de la diana catódica lineal D_c y la dimensión de soporte lineal D_h son paralelas entre sí. En otro ajuste, la dimensión del ánodo remoto D_a es mayor o igual a la dimensión de la diana catódica lineal D_c , que es mayor o igual a la dimensión del soporte lineal D_h .

Se apreciará que un campo magnético externo se puede aplicar en una cámara de recubrimiento para las realizaciones expuestas anteriormente para mejorar aún más la densidad del plasma durante los procedimientos de deposición de recubrimiento de pulverización catódica con magnetrón mejorados con plasma de arco. El campo magnético preferible tendrá líneas de campo magnético alineadas generalmente en paralelo a la cámara de arco catódico y/o el ánodo remoto. Esto contribuirá al incremento del voltaje de la descarga de arco y, por tanto, a la energía de los electrones y a la longitud de la propagación del plasma de arco a lo largo de la cámara de recubrimiento. Por ejemplo, el campo magnético externo se puede aplicar a lo largo de las cámaras de recubrimiento en el sistema de recubrimiento en línea de la Figura 5.

Una distribución de la densidad de plasma uniforme en las cámaras de recubrimiento expuesta anteriormente se puede lograr mediante la distribución adecuada de ambos ánodos remotos y la superficie de emisión de electrones de las dianas catódicas de arco de vacío protegido para cubrir de manera pareja el área de deposición de recubrimiento. Por ejemplo, si el área de deposición del recubrimiento es de 1 m de altura, a continuación, tanto las superficies de emisión de electrones de la diana catódica protegido como las superficies del ánodo remoto que recolectan la corriente de electrones deben estar distribuidas de manera tal que cubran de manera pareja esta área de deposición de recubrimiento de 1 m de alto. Para lograr estos requisitos, varias dianas catódicas pequeñas pueden instalarse en una cámara catódica protegida, cada uno de las dianas catódicas se conecta al polo negativo del suministro de energía independiente. las dianas catódicas se distribuyen generalmente de manera pareja, de modo tal que los flujos de electrones emitidos por cada diana catódica se superpongan fuera de la cámara catódica protegida, proporcionando una distribución generalmente pareja de la densidad de electrones sobre el área de deposición de recubrimiento. Los polos positivos de los suministros de energía de arco remoto se pueden conectar a una placa de ánodo grande que tiene la altura generalmente igual a la de la del área de deposición de recubrimiento y que mira al soporte de sustratos con los sustratos a recubrir, como se muestra en las Figuras 1 y 4 a 6. El conjunto de placas de ánodos, cada una conectada al polo positivo de los suministros de energía de arco remoto, puede usarse para proporcionar una distribución pareja de la densidad de electrones sobre el área de deposición de recubrimiento. De manera similar, en lugar de usar un conjunto de dianas catódicas pequeñas en una cámara catódica protegida, se puede usar una única

diana catódica grande que tiene una dimensión lineal similar a la dimensión lineal de la zona de deposición de recubrimiento como un cátodo de descarga de arco remoto. En este caso, los puntos de emisión de electrones (es decir, puntos de arco catódico) son barridos sobre la diana catódica para proporcionar una distribución generalmente pareja de la corriente de emisión de electrones sobre el área de deposición de recubrimiento. El barrido de los puntos de arco catódico sobre una gran área de diana catódica se puede lograr, por ejemplo, mediante el direccionamiento magnético de los puntos de arco catódico sobre el área de evaporación del arco de la diana catódica o mediante el movimiento mecánico.

Con referencia a las Figuras 8A-8H, se proporcionan ilustraciones esquemáticas que representan un ajuste de un sistema de recubrimiento de las Figuras 7A y 7B que usa un punto de arco catódico magnéticamente direccionado. La presente variación incorpora características de la Patente de los EE.UU. No. 6.350.356. Haciendo referencia a la Figura 8A, el sistema 190' incluye una bobina magnética de conducto 270 que rodea al conducto de plasma 272 que se forma dentro de la cámara catódica 194 entre los dos lados opuestos de la carcasa 274. La bobina 270 incluye el bobinado 270A que mira al lado 196A de la diana catódica 196 y un bobinado opuesto 270B que mira al lado 196B de la diana catódica 196. La diana catódica 196, por lo general, tiene forma de barra con una dimensión larga d_A . La bobina de conducto 270 genera un campo magnético a lo largo del conducto 272 con las líneas de fuerza magnética generalmente en paralelo a los lados 196A y 196B de la diana catódica 196. Cuando el punto de arco catódico 278 se enciende en las superficies de evaporación 196A o 196B, el punto de arco 278 se mueve a lo largo de un lado largo de la barra-cátodo 196. Al final de la barra, el punto de arco 278 cambia de lado y continúa su movimiento en la dirección opuesta, en el lado opuesto de la barra. Las placas cerámicas de aislamiento (no se muestran) unidas a los lados de la barra del cátodo, de manera perpendicular a las líneas de fuerza magnética, impiden que el punto de arco se escape de la superficie de evaporación del cátodo 196. Las protecciones 198 se instalan opcionalmente en los extremos del conducto del plasma 272 que mira al área de recubrimiento en la cámara de recubrimiento 192. En un ajuste, las protecciones 198 son móviles para permitir la apertura y el cierre del conducto del plasma 272, dependiendo de la etapa del procedimiento de recubrimiento. Cuando las protecciones 198 se cierran, el procedimiento RAAMS puede efectuarse con la ionización mejorada del entorno de pulverización catódica con magnetrón mediante el plasma RAAD. Cuando se abren los extremos del conducto 272, el plasma de arco catódico fluye a lo largo de las líneas de fuerza magnética generadas por la bobina de conducto 270 hacia los sustratos 22 a recubrir, lo que da como resultado la deposición de recubrimientos de arco catódico desde el plasma de vapor de metal de arco catódico, que se filtra magnéticamente de átomos de metal neutros y macropartículas indeseables. La deposición del recubrimiento de arco catódico filtrado puede llevarse a cabo como una sola fase de procedimiento o conjuntamente con la pulverización catódica con magnetrón mediante las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 204-210. La ionización y la activación del entorno de plasma mediante la descarga de arco remoto establecida entre el cátodo 196 en la cámara catódica 194 y los ánodos remotos 210, 214 mejora la densidad, la suavidad y otras propiedades físicoquímicas y funcionales de los recubrimientos.

Haciendo referencia a las Figuras 8B y 8C, se proporcionan ilustraciones esquemáticas que representan el mecanismo de direccionamiento magnético de los puntos de arco catódico alrededor de un cátodo de barra rectangular alargado. El cátodo con forma de barra rectangular 196 se posiciona entre dos porciones de los bobinados de la bobina de conducto 270. El bobinado izquierdo 270A y el bobinado derecho 270B miran a los lados de evaporación del cátodo 196. El lado del cátodo 196A mira al lado de bobinado de la bobina de conducto 270A, mientras que el lado del cátodo 196B mira al lado de bobinado de la bobina de conducto 270B. El campo magnético B generado por los bobinados de la bobina de conducto 270 es paralelo a los lados del cátodo 196 que miran hacia el bobinado de la bobina de conducto y, al mismo tiempo, es perpendicular al eje d_A del cátodo alargado 196 (es decir, los lados largos de la diana catódica 196). Cuando el punto de arco catódico 278 se enciende en un lado del cátodo 196 que mira al arco de bobinado de la bobina de conducto, la corriente I_{arc} se genera de manera perpendicular a la superficie de la diana catódica 196 y, por lo tanto, de manera perpendicular a las líneas de fuerza magnética B generadas por la bobina de conducto 270. En este caso, el punto de arco catódico se mueve a lo largo del lado largo del cátodo con la velocidad promedio V_{arc} , que es proporcional a la fuerza de Ampere definida por un producto de la corriente de arco I_{arc} y el campo magnético B , siguiendo la ley de Ampere bien conocida:

$$V_{arc} = (-/+)c * I_{arc} * B, \quad (1)$$

donde c es un coeficiente que se define por el material catódico. La dirección del movimiento del punto de arco (el signo entre paréntesis en las fórmulas anteriores) se determina también por el material de la diana catódica, ya que el campo magnético generado por la bobina de conducto 270 es paralelo a cuatro lados de la diana catódica (es decir, tiene un largo en la misma dirección alrededor de los lados de evaporación de la diana catódica 196). Por ejemplo, cuando se crea el punto de arco catódico 278A en el lado catódico 196A que mira al bobinado de la bobina de conducto 270A, el punto de arco se mueve hacia abajo a la diana catódica 196, a lo largo del lado largo 196A. Al final de la barra

de cátodo, los puntos de arco giran al lado corto 196D, después giran al lado largo 196B y, a continuación, continúan hacia arriba a lo largo del lado largo 196B, etc.

La Figura 8C representa los puntos de arco en movimiento a lo largo de los lados de evaporación 196a, 196b, 196c y 196d de la diana catódica 196, que son paralelos a las líneas de fuerza magnética 280 generadas por la bobina de conducto 270. La bobina de conducto se energiza mediante el suministro de energía de la bobina de conducto 282 mientras que el suministro de energía 284 se conecta a la diana catódica 196. La bobina de conducto incluye las bobinas 270a y 270b conectadas mediante un circuito eléctrico que incluye los conductores de corriente 286, 288, 290 y 292. Los lados de la diana catódica 196 perpendiculares a las líneas de fuerza magnética están cubiertos por las placas de aislamiento 294 que impiden que los puntos de arco se escapen de la superficie de evaporación de la diana catódica 196. El plasma de arco catódico queda atrapado por la fuerza magnética 280 generada por las bobinas de conducto 270A y 270B, que impiden la difusión del plasma en las líneas de fuerza magnéticas 280, mientras que el plasma puede moverse libremente a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas 280.

La Figura 8D proporciona detalles adicionales con respecto al direccionamiento de los puntos catódicos mediante la bobina de conducto. El campo magnético generado por la bobina de conducto 270 direcciona los puntos de arco catódico a lo largo de los lados de la barra diana catódica 196 en paralelo a las líneas de fuerza del campo magnético, como se expuso anteriormente. La dirección del movimiento de los puntos de arco catódico se muestra con las flechas A_D. Los extremos del conducto del plasma 272 se abren, lo que permite que el plasma de vapor de metal catódico fluya a lo largo de líneas de fuerza magnética hacia los sustratos 22 instalados en el soporte de sustratos 20 en la cámara de recubrimiento. Los neutros y las macropartículas quedan atrapados dentro de la cámara catódica en las paredes internas del conducto 272, rindiendo casi un 100 % de plasma de vapor de metal ionizado que entra en el área de recubrimiento fuera del conducto de plasma 272. Este diseño de la cámara catódica es esencialmente el de una fuente de plasma de vapor de metal de arco catódico filtrado capaz de deshacerse de macropartículas y neutros en el plasma de vapor de metal resultante y que produce casi el 100 % de vapor de metal ionizado atómicamente limpio para la deposición de recubrimientos avanzados. El plasma RAAD establecido entre el cátodo 196 y los ánodos remotos 212, 214 mejora la ionización y la activación del entorno de plasma en los procedimientos de deposición de recubrimiento RAAMS, lo que resulta en la mejora de las propiedades de recubrimiento. En este diseño, los procedimientos de deposición de recubrimiento híbrido pueden efectuarse como una única deposición de recubrimiento con magnetrón o arco catódico o como un procedimiento híbrido que combina el plasma de vapor de metal de arco catódico con el flujo de pulverización catódica de metal con magnetrón inmerso en un entorno de plasma de arco remoto altamente ionizado.

Incluso con referencia a la Figura 8D, la cuestión del realce del plasma de arco del procedimiento de deposición de recubrimiento de pulverización catódica con magnetrón de área grande y los procedimientos híbridos se aborda mediante el posicionamiento de al menos un ánodo de arco remoto fuera de la línea de vista con la barra diana catódica 196. En esta variación, al menos un sustrato 22 sostenido en el soporte de sustratos 20' y las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 204-210 se posicionan en una región de cámara de recubrimiento fuera del conducto de plasma 272. El presente procedimiento RAAMS sumerge efectivamente el flujo de pulverización catódica de metal generado por las fuentes de magnetrón convencionales en el plasma gaseoso de descarga de arco de ánodo remoto denso y altamente ionizado (RAAD). El suministro de energía de arco remoto (no se muestra) que alimenta el plasma RAAD se instala entre la diana catódica del arco 196 y el al menos un ánodo remoto 212. Los ánodos remotos 212, 214 proporcionan al menos el 20 % del voltaje de circuito abierto más alto que el suministro de energía que alimenta la descarga de arco principal en la cámara catódica, que se enciende entre el cátodo de arco 196 y el ánodo próximo. El ánodo próximo puede ser una pared interna de los recintos de conducto de plasma 296a, 296b u, opcionalmente, un electrodo de ánodo independiente dentro del conducto de plasma 272. En otro ajuste, se pueden usar varios ánodos remotos adicionales, cada uno de ellos asociados con al menos un cátodo de arco posicionado dentro del conducto de plasma 272. Los ánodos remotos se posicionan en posiciones estratégicas dentro de la cámara de recubrimiento entre las aberturas de extremo del conducto de plasma 272 fuera de la línea de vista del cátodo 196. La distancia mínima entre las aberturas de extremo del conducto de plasma 272 y los ánodos remotos 212, 214 debe ser menor que la distancia de degradación de descarga del plasma cuando el voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo remoto supera de 1,2 a 10 veces la caída de voltaje entre el cátodo y el ánodo principal (próximo), que puede estar eléctricamente conectado a tierra o aislado.

La Figura 8E proporciona una representación de una variación del sistema de recubrimiento de la Figura 8A-8D que utiliza un filtro de macropartículas. El diseño de esta variación incorpora el filtro de micropartículas avanzado de la Patente de los EE.UU. No. 7.498.587 y la Solicitud de Patente de la Unión Europea No. EP 1 852 891 A2. El sistema 190' incluye las bobinas de recorte 300a y 300b posicionadas de manera adyacente a los lados opuestos de la diana catódica 196 y mirando a lados opuestos del conducto de plasma 272. Las paredes internas de los conductos opuestos 296a y 296b se proporcionan con muescas u, opcionalmente, con deflectores para atrapar macropartículas. La bobina

de conducto 270 rodea los conductos 272 con la porción de bobinado 270a estando paralela al lado largo de la diana catódica 196a, mientras que mira al lado del conducto 296a. De manera similar, la porción de bobinado 270b es paralela al lado largo de la diana catódica 196b y mira al lado del conducto 296b. Las bobinas de recorte 300a, 300b incluyen núcleos magnéticos 302 que están rodeados por bobinas electromagnéticas 304. Los puntos de arco catódico se mueven a lo largo de los lados de evaporación 196a y 196b de la diana catódica 196 bajo la influencia de la fuerza de Ampere, según la expresión (1) expuesta anteriormente. Los lados de la diana catódica 196 perpendicular al plano de la simetría del conducto 272 están cubiertos por placas de aislamiento cerámico 294a y 294b para impedir que los puntos de arco se escapen de la superficie de evaporación de la diana catódica 196. La dirección del campo magnético generado por las bobinas de recorte 300a, 300b coincide con la dirección del campo magnético generado por la bobina de conducto 270. Sin embargo, en las proximidades de las superficies de evaporación de la diana catódica 196a o 196b, las líneas de fuerza magnética generadas por las bobinas de recorte 300a, 300b tienen una forma de arco, permitiendo así el confinamiento con forma de arco de los puntos de arco catódico dentro del área de evaporación de la diana catódica, como se requiere según la regla bien conocida del ángulo agudo (véase, *por ejemplo*, R.L.Boxman, D.M.Sanders y P.J.Martin, Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. Park Ridge, Nueva Jersey: Noyes Publications, 1995 páginas 423 a 444).

Las Figuras 8F, 8G y 8H proporcionan esquemas que ilustran el mecanismo del confinamiento de arco mediante el campo magnético generado por las bobinas de recorte 300a, 300b. Los puntos de arco catódico 278 están ubicados bajo un punto superior de las líneas de fuerza magnética con forma de arco, según es requerido por la regla de ángulo agudo del confinamiento de punto de arco. El campo magnético con la configuración con forma de arco encima de la superficie de evaporación de la diana catódica 196 se genera entre el polo Sur de la bobina de recorte 300a y el polo Norte de la bobina de recorte 300b a ambos lados de la diana catódica 196 que mira al conducto 272. La configuración del campo magnético dentro del conducto de plasma 272 se evalúa usando un cálculo numérico. El campo magnético con el conducto de plasma 272, cuando tanto la bobina del conducto 270 como las bobinas de recorte 300 se ENCIENDEN, genera un campo magnético en la misma dirección que se muestra en la Figura 8G. Esta figura demuestra que las líneas de fuerza magnéticas se dirigen en la misma dirección, mientras que todavía tienen una configuración con forma de arco en las proximidades de la superficie de evaporación de la diana catódica 196. En este modo, el plasma de arco catódico magnéticamente filtrado de los átomos de metal neutros y las macropartículas fluye a lo largo de las líneas de fuerza magnética en sentido contrario al conducto de plasma 272 hacia los sustratos a recubrir (no se muestra) en el área de recubrimiento de la cámara de recubrimiento fuera del conducto de plasma 272. En este modo de deposición de arco catódico filtrado, casi el 100 % del plasma de vapor de metal ionizado con un poco, de haber alguno, de los átomos de metal neutros o las macropartículas se deposita sobre los sustratos, creando así recubrimientos libres de defectos y con propiedades superiores. Los recubrimientos de pulverización catódica con magnetron también se pueden depositar durante este modo de operación mediante los magnetrones posicionados en las paredes externas del conducto del plasma 272. La ionización y la activación adicionales del entorno de plasma de deposición de recubrimiento durante este modo de operación se proporciona mediante la descarga de arco remoto establecida entre el cátodo 196 y los ánodos remotos 212, 214 posicionados junto a los magnetrones en la pared externa del conducto del plasma 272 o, alternativamente, en la pared interna de la cámara de recubrimiento de manera opuesta a las fuentes magnetrónicas (no se muestra). Con referencia a la Figura 8H, se muestra que las líneas de fuerza del campo magnético cambian las direcciones dentro del conducto de plasma cuando la bobina de conducto 270 se "APAGA". Sin embargo, cuando las bobinas de recorte 300a, 300b se "ENCIENDEN", un campo magnético con forma de arco se genera por encima de la superficie de evaporación de la diana catódica 196. Dependiendo del modo de operación, el campo magnético deflector, generado por la bobina de conducto deflector 270, se puede "ENCENDER" o "APAGAR". Cuando el campo magnético de la bobina de conducto deflector 270 se "ENCIENDE", el plasma de vapor de metal generado por la diana catódica 196 se transporta de manera bidireccional a lo largo del conducto de plasma 272 hacia los sustratos 22. Cuando la bobina de conducto deflector 270 se "APAGA", el plasma de vapor de metal generado por la diana catódica 196 no se transporta hacia los sustratos 22, aunque los puntos de arco catódico continúan su movimiento alrededor de la barra diana 196 impulsados por el campo magnético de direccionamiento generado por las bobinas de recorte 300a, 300b. En esta variación, la bobina de conducto trabaja como un obturador magnético que elimina la necesidad de un obturador mecánico o una protección, como se muestra en la Figura 7A. Cuando el obturador magnético está "ENCENDIDO", el vapor de metal es transportado a través del conducto de plasma hacia los sustratos 22 en la cámara de procesamiento. Cuando el obturador magnético está "APAGADO", el obturador magnético está cerrado y el vapor de metal no llega a los sustratos 22. La Figura 8H muestra que la distribución del campo magnético en el conducto de plasma 272 es cero cuando la corriente de la bobina de conducto se configura en cero, las bobinas de recorte se configuran en 0,1 A y la corriente de la bobina de conducto es cero. Se puede observar que cuando el campo magnético de la bobina de conducto 270 es cero, no hay campo magnético para transportar el plasma de vapor de metal en sentido contrario al conducto de plasma 272, aunque las bobinas de recorte 300a, 300b aún generan un campo magnético con una geometría con forma de arco que es suficiente tanto para el confinamiento de los puntos de arco 278 dentro del área de evaporación de la diana 196 (configuración de arco magnético en la superficie diana de evaporación) como para direccionar el movimiento del

punto de arco alrededor de la barra catódica 196. En este modo de operación, cuando el plasma de vapor de metal queda atrapado dentro del conducto de plasma, los electrones todavía fluyen en sentido contrario desde el conducto de plasma hacia los ánodos remotos posicionados fuera del conducto de plasma 272 en la cámara de recubrimiento. La descarga de arco remoto resultante se establece entre el cátodo 196 en el conducto de plasma 272 y los ánodos

- 5 remotos (no se muestran) que pueden posicionarse en la pared externa del conducto de plasma 272 o en la pared de la cámara de recubrimiento en una posición opuesta a las fuentes magnetónicas (no se muestran). El plasma RAAD mejora la ionización y la activación del entorno de procesamiento de deposición de recubrimiento en la cámara de recubrimiento, lo que resulta en la deposición de recubrimientos avanzados con propiedades superiores.
- 10 Cuando el obturador magnético está cerrado, la diana catódica 196 todavía genera una corriente de electrones de gran tamaño que se puede extraer hacia los ánodos remotos a fin de establecer un plasma de descarga asistida por arco remoto en la cámara de procesamiento. El plasma RAAD se caracteriza por una alta densidad, que oscila de 10^{10} - 10^{13} cm^{-3} , una alta temperatura de electrones que oscila de 3 a 20 eV y el alto potencial de plasma que generalmente se parece al potencial del ánodo remoto. Un estudio experimental confirma que el obturador magnético
- 15 puede sellar el conducto de plasma 272 impidiendo así que el plasma de vapor de metal llegue a los sustratos 20 cuando el obturador magnético está cerrado. La barra diana catódica 196 usada en estos experimentos se hizo con acero inoxidable. Las obleas de silicio que se usan como sustratos 22 se instalan en ejes de soporte de sustratos del soporte de sustratos de mesa redonda que rota a 5 RPM durante 2 horas del procedimiento de deposición de recubrimiento. La corriente de las bobinas de recorte 300 se configura en 0,2 A, mientras que la corriente de la bobina
- 20 de conducto 270 se configura en cero. La presión de argón es de 1,5 mTorr, mientras que la corriente del arco principal es de 140 A. Después de una exposición dos horas, los sustratos se descargan y el espesor del recubrimiento se mide por medio de interferometría óptica, usando un perfilador óptico Veeco NT3300. Los resultados se presentan en la Tabla 1 a continuación:

25 Tabla 1.

Medición	Espesor (nm) chip de Si	Espesor (nm) oblea de Si
1	11	15
2	12	8,5
Promedio	11,5	11,75
Promedio combinado	11,625	

De los resultados presentados en la Tabla 1, se deduce que la velocidad de deposición sobre un soporte de sustratos rotatorio no excede 6 nm/h cuando el obturador magnético está cerrado. El espesor del recubrimiento promedio

30 producido en un procedimiento de deposición de recubrimiento, ya sea por deposición de arco catódico filtrado o por fuentes de pulverización catódica con magnetrón, típicamente supera 1 $\mu\text{m}/\text{h}$. En este caso, la fuga del vapor de metal no aumenta los elementos dopantes en un recubrimiento sobre el nivel habitual de impureza de la diana catódica usada en los procedimientos de deposición de recubrimiento industrial.

35 Los siguientes procedimientos pueden llevarse a cabo en una cámara de ingeniería de superficie asistida con arco remoto (RAASE):

- limpieza/decapado de iones en el plasma RAAD denso (el obturador magnético está cerrado);
- 40 nitruración de iones de baja temperatura o nitruración de óxido, carburación de plasma. La temperatura de los sustratos durante este procedimiento puede ser tan baja como de 150 °C. La velocidad de nitruración de iones de acero M2 en el plasma de nitrógeno RAAD oscila típicamente de 0,1 a 0,5 $\mu\text{m}/\text{min}$ (el obturador magnético está cerrado);
- implantación de iones de baja energía (la polarización del sustrato se ubica por debajo de 2 kV) (el obturador magnético está cerrado);
- 45 deposición de recubrimientos de arco filtrado (el obturador magnético está abierto);
- deposición de recubrimiento de pulverización catódica con magnetrón mediante el procedimiento de pulverización catódica con magnetrón asistida por arco remoto (RAAMS) (el obturador magnético está cerrado); y
- deposición de recubrimientos de pulverización catódica con magnetrón modulados mediante recubrimientos de arco filtrados (obturador magnético ENCENDIDO/APAGADO según el ciclo de trabajo para lograr un período de
- 50 modulación de recubrimiento requerido).

Con referencia a la Figura 9A-E, se proporcionan un esquema de un sistema bidireccional de magnetrón de arco

filtrado e híbrido de pulverización catódica con magnetrón asistido con arco filtrado ("FAAMS") que tiene fuentes de magnetrón adicionales. En esta variación, las fuentes de pulverización catódica con magnetrón adicionales 310-316 se posicionan de manera adyacente a la cámara catódica del arco 194 magnéticamente acoplada con la fuente de arco filtrado 196 y las dianas magnetrónicas forman un ángulo abierto en el intervalo de 10 a 80 grados. Este ángulo de apertura A_o ayuda a centrar el flujo de pulverización catódica con magnetrón hacia los sustratos. En este procedimiento de deposición de recubrimiento híbrido de pulverización catódica con magnetrón asistido por arco filtrado, el plasma de metal de arco filtrado fluye a lo largo de las líneas del campo magnético del campo magnético de transporte creado por la bobina del conducto 270. Por otra parte, las líneas del campo magnético divergen en la salida del conducto del plasma 272. Esto resulta en iones de metal desde el cátodo de arco filtrado que pasa por el área diana de pulverización catódica con magnetrón, cerca de la superficie diana y cruzando un área de descarga de magnetrón con una topología de campo magnético de bucle cerrado grande. Una porción sustancial de estos iones metálicos se encuentra atrapada en el campo magnético del magnetrón y contribuye a la pulverización catódica de la diana magnetrónica, que puede ocurrir incluso sin gas de pulverización catódica (argón u otro gas noble) y dentro de un intervalo de presión ampliado de 10^{-6} a 10^{-2} Torr. Otra porción de los iones metálicos generados por cátodos de arco filtrado continúa hacia los sustratos 22, donde se mezclan con el flujo de pulverización catódica con magnetrón de enfoque, proporcionando una fracción de metal ionizado del procedimiento de deposición de recubrimiento por pulverización catódica con magnetrón. Es bien sabido que el aumento de la velocidad de ionización del vapor de metal mejora la adherencia, la densidad y otras propiedades mecánicas del recubrimiento, así como también su suavidad.

La Figura 9B proporciona características adicionales de la fuente bidireccional híbrida de arco filtrado-magnetrón FAAMS. Las bobinas magnéticas de enfoque adicionales y opcionales 320 se posicionan de manera opuesta a la abertura de salida del conducto de plasma, lo que proporciona una mejora adicional de la densidad de plasma y controla la mezcla del flujo de pulverización magnetrónica con el flujo de plasma de metal enfocado hacia los sustratos a recubrir en una cámara de recubrimiento (no se muestra). Además, las bobinas magnéticas de enfoque opcionales 324 se posicionan alrededor de las dianas magnetrónicas 310-316 en la porción de salida del conducto de plasma 272. Las bobinas de enfoque 324 mejoran la concentración de la densidad del plasma cerca de las dianas magnetrónicas. La dirección de las líneas de fuerza magnética generadas por estas bobinas en el lado adyacente a la bobina de conducto es la misma que tiene el campo magnético de transporte generado por la bobina de conducto. La Figura 9C proporciona una ilustración esquemática de un ajuste del sistema de la Figura 9B. En este ajuste, los pares de bobinas magnéticas de enfoque 328 se posicionan en la porción de salida del conducto de plasma que rodea el conducto de plasma a ambos lados de las fuentes magnetrónicas. La Figura 9D proporciona una sección transversal superior de los sistemas de recubrimiento de las Figuras 9A-C, en las que se representa el plasma de arco remoto (F1), los flujos de pulverización catódica con magnetrón (F2) y la corriente de plasma de arco filtrado (F3). La dirección del campo magnético generado por estas bobinas de enfoque coincide con la dirección del campo magnético de transporte generado por la bobina de conducto. La Figura 9E proporciona incluso otra variación de un sistema de recubrimiento. La Figura 9E representa un resumen de la cámara de recubrimiento de sección 192 con el sustrato rotatorio sosteniendo una placa giratoria 20 con los sustratos a recubrir 22. La cámara catódica 194 se posiciona de manera opuesta a los sustratos a revestir 22 en la cámara de recubrimiento 192. La descarga de arco principal en una cámara catódica 194 se enciende mediante un percutor 440 en la diana catódica 196, los cuales se encuentran encerrados dentro de la carcasa 274. La carcasa 274 tiene una protección 198 con aberturas que no son transparentes para partículas pesadas tales como iones, átomos y macropartículas emitidas desde la superficie de diana catódica 196, pero permiten que los electrones fluyan libremente hacia los ánodos remotos en la cámara de recubrimiento 192. Las dianas magnetrónicas 310, 312 se posicionan adyacentes a la protección de la cámara catódica 198, de modo tal que el flujo de pulverización catódica emitida desde las dianas magnetrónicas se acople con el plasma altamente ionizado frente a la protección 198 y se enfoque hacia los sustratos 22 en la cámara de recubrimiento 192. En esta disposición, la porción catódica del plasma de arco remoto que se genera frente a la protección del cátodo 198 se acopla con el flujo de pulverización catódica con magnetrón que resulta en un aumento sustancial de la ionización y la activación del plasma gaseoso de metal generado por las dianas magnetrónicas 310, 312, lo cual contribuye a una mejora adicional de la adherencia del recubrimiento, la densidad, la suavidad, la reducción de los defectos y la mejora de sus propiedades funcionales para diferentes aplicaciones.

El sistema de ingeniería de superficie FAAMS puede operar en los siguientes modos:

limpieza iónica por inmersión en plasma RAAD, nitruración iónica e implantación iónica de baja energía. En este modo, la fuente de arco catódico está funcionando, las dos bobinas de recorte están ENCENDIDAS, pero la bobina de conducto de transporte de plasma está APAGADA. El APAGADO de la bobina de conducto impide de manera efectiva que el plasma de metal generado por el cátodo posicionado en un centro del conducto de plasma llegue al conducto de plasma hacia los sustratos a recubrir en una cámara de recubrimiento, pero el plasma RAAD denso y altamente ionizado llena toda la cámara de procesamiento, incluyendo el interior del conducto de plasma y el área en una cámara donde los sustratos a recubrir se posicionan en el soporte de sustratos. Este plasma gaseoso denso proporciona un

- entorno altamente ionizado para la limpieza de iones por inmersión en plasma, la nitruración iónica (así como también la carburación de iones, la carburación de óxido, la boronización y otros procedimientos de saturación de iones) y la implantación de iones de baja energía. También se puede usar para los procedimientos de CVD asistidos por arco remoto (RAACVD), incluyendo la deposición de un recubrimiento de carbono tipo diamante (DLC) cuando la atmósfera gaseosa contenida en el hidrocarburo se crea en una cámara de recubrimiento. En este modo, puede llevarse a cabo el procedimiento de CVD asistido por plasma de arco remoto. Por otra parte, es posible depositar recubrimientos de diamante policristalinos cuando los sustratos se calientan a una temperatura de deposición que oscila de 500 a 1000 °C (dependiendo del tipo de sustrato). En un procedimiento como tal, la presión del gas oscila típicamente de 1 a 200 mTorr, la atmósfera de gas incluye típicamente de un 0,1 a un 2 % de metano en hidrógeno a una velocidad de flujo de hidrógeno que oscila de 50 a 200 sccm, dependiendo de la capacidad del sistema de bombeo, siendo lo restante argón. La bobina de conducto funciona como un obturador magnético, cerrando efectivamente la salida del plasma de metal generado por el cátodo en un conducto de plasma, mientras abre camino para el plasma gaseoso generado por RAAD.
- 15 Cuando la bobina de conducto está APAGADA (el obturador magnético está cerrado) y se crea el plasma RAAD dentro de la cámara de recubrimiento entre el cátodo en el conducto de plasma y el o los ánodos remotos en un área de deposición de recubrimiento fuera del conducto de plasma, se puede usar el entorno de plasma altamente ionizado para los procedimientos de pulverización catódica con magnetrón asistidos por plasma (RAAMS). En este caso, las fuentes magnetrónicas posicionadas fuera del conducto del plasma en un área de recubrimiento están ENCENDIDAS y el procedimiento de pulverización catódica con magnetrón se lleva a cabo en un entorno de plasma RAAD altamente ionizado. En este procedimiento, la productividad de la pulverización catódica con magnetrón aumenta en más del 30 % y el recubrimiento se densifica mediante el bombardeo de iones de la superficie del sustrato por los iones que porta el plasma gaseoso.
- 25 Cuando la bobina de conducto de plasma está ENCENDIDA, el obturador magnético está abierto y el plasma de metal generado mediante el cátodo en un conducto de plasma fluye hacia el área de deposición de recubrimiento a lo largo de las líneas de fuerza magnética del campo magnético de transporte generado por la bobina de conducto. El plasma de metal de arco filtrado se puede usar para la deposición de la variedad de recubrimientos, incluyendo el recubrimiento de carbono amorfo tetrahédrico libre de hidrógeno súper duro (ta-C) cuando la barra de grafito se usa como una diana catódica en un conducto de plasma. Cuando las fuentes magnetrónicas, posicionadas en la porción de salida del conducto de plasma y con sus dianas mirando a los sustratos, están ENCENDIDAS, se inicia el procedimiento de pulverización catódica asistida por arco filtrado híbrido (FAAMS). En este caso, el plasma de metal de arco filtrado, que se ioniza en un 100 % pasa las fuentes de magnetrones mezclándose con el flujo de metal atómico de pulverización catódica con magnetrón, que generalmente tiene una velocidad de ionización baja de < 5 %. El flujo de metal atómico de pulverización catódica con magnetrón y plasma de metal de arco filtrado mixto se dirige hacia los sustratos en un área de recubrimiento en frente de la salida del conducto de plasma, lo que proporciona una deposición de recubrimiento de pulverización catódica con magnetrón asistida por arco filtrado híbrido con concentraciones altas y controlables del flujo de átomos de metal de deposición.
- 40 La Figura 10 proporciona una descripción esquemática de los procedimientos físicos involucrados en la descarga de arco remoto bidireccional de la presente invención. El arco principal es iniciado por un encendedor de arco sobre una superficie de diana catódica 196 aislada de la cámara de descarga por el par de bobinas de recorte 300. Esta fuente puede funcionar en dos modos: primero, en un modo de deposición del recubrimiento, cuando el plasma de vapor de arco es transportado a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas del campo magnético longitudinal creadas por la fuerza de la bobina de conducto 270; y segundo, en el modo de emisión de electrones, cuando la bobina de conducto se apaga y el plasma de arco queda confinado y magnéticamente aislado de la cámara de procesamiento mediante el campo magnético creado por un par de bobinas de recorte 300. El potencial del plasma dentro del conducto de plasma 272 es bajo, próximo al potencial del ánodo próximo, que, en la mayoría de los casos, está conectado a tierra, mientras que en el plasma de descarga de arco remoto el potencial eléctrico es alto, próximo al potencial del ánodo remoto 214. La distribución típica del potencial de plasma entre el conducto de plasma 272 y el ánodo remoto 214, obtenida por el modelado del elemento finito se muestra en la Figura 2.
- Con referencia a la Figura 11, se proporciona un esquema de un sistema de recubrimiento por lotes con un conjunto de cámara catódica protegido, ubicado de manera periférica. El sistema de recubrimiento 330 incluye una cámara de vacío 332, un conjunto de cámara catódica 334 que incluye la cámara catódica 336, el cátodo 338 y la protección 340. El sistema 330 también incluye un suministro de energía principal 342 que establece el potencial de voltaje entre el cátodo 338 y el ánodo principal 344. El sistema 330 también incluye fuentes de pulverización catódica con magnetrón 356-366, cada una de las cuales incluye una diana Ts, un suministro de energía Ps y un ánodo As. El sistema 330 también incluye el ánodo remoto 360, que se establecen a un potencial de voltaje con respecto al cátodo 338 mediante el suministro de energía 362. En esta realización, los sustratos 22 se mueven axialmente a lo largo de una dirección

d3 a medida que son recubiertos.

La Figura 12 ilustra una variación adicional que proporciona una fuente de emisión de electrones de arco catódico protegido ubicada en el centro de la cámara de recubrimiento. En particular, la presente variación proporciona un sistema de recubrimiento por lotes circular 380 con el conjunto de la cámara catódica 382 situado en su zona central. El cátodo 384 se posiciona dentro del conjunto de la cámara catódica 382 generalmente a lo largo de los ejes del sistema de recubrimiento 380. El conjunto de cámara catódica 382, respectivamente, incluye recintos catódicos 388 con aberturas 390 y 392 definidas en los mismos, un cátodo 384, ánodos principales opcionales (no se muestran) y protecciones 396, 398. El recinto 388 y las protecciones 396, 398, respectivamente, aíslan al cátodo 384 de la cámara de vacío 400 y también pueden servir como un ánodo principal para la descarga de arco, que se enciende en una cámara catódica 382. También se proporciona el suministro de energía de arco principal entre el cátodo 384 y el recinto del ánodo 388 (no se muestra). El recinto 388 y las protecciones 396, 398 definen, cada uno, aberturas para la transmisión de corrientes de emisión de electrones en la cámara de vacío 400, mientras que, al mismo tiempo, sirven como una barrera para impedir que partículas pesadas, como átomos, iones y macropartículas de vapor de metal, emitidos desde el cátodo 384, lleguen a los sustratos 22 a recubrir en la cámara de recubrimiento 400. Las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 402, 404, y 406 se unen a la pared 408 de la cámara 400. Los ánodos remotos 410, 412 y 414 se posicionan junto a las fuentes magnetrónicas correspondientes, preferentemente rodeando estas fuentes de pulverización catódica. Los sustratos 22 se posicionan en la plataforma de la mesa giratoria 420 a la distancia d1 entre la cámara catódica y las dianas de pulverización catódica con magnetrón. La distancia desde la superficie de la diana magnetrónica a los sustratos 22 típicamente oscila de 4 a 10 pulgadas (de 10,16 a 25,4 cm). Los suministros de energía de arco remoto 424, 426, y 428 se instalan entre los ánodos remotos 410, 412 y 414 y el cátodo central de 384 en la cámara catódica 382. El cátodo 384 puede ser un cátodo de filamento termoiónico, aunque, preferentemente, puede usarse el cátodo de arco de vacío evaporativo frío, el cual no es sensible al entorno de procesamiento del plasma reactivo, dado que este último puede contener gases químicamente agresivos, tales como metano, oxígeno y nitrógeno, para la deposición del recubrimiento de carburos, óxidos y nitruros. El cátodo 384 es ya sea un filamento termoiónico alargado o un cátodo frío en una forma de barra o varilla de metal alargada. Por otra parte, el cátodo 384 se posiciona dentro de la cámara catódica 382 a lo largo de los ejes de la cámara de recubrimiento 400 con la longitud de su zona de emisión de electrones paralela y dimensionalmente, en términos generales, igual a la altura de la zona de carga sustrato 22. Por otra parte, el cátodo 384 tiene una dimensión de largo que es ya sea inferior o igual a la altura de los ánodos remotos 310, 312 y 314. Las alturas de las dianas magnetrónicas también son ya sea inferiores o iguales a la altura de los ánodos remotos.

En un ajuste, los magnetrones 402, 404, 406 que se muestran en la Figura 12 pueden ser reemplazados con calentadores planos. Los sustratos a recubrir pueden colocarse en la superficie del calentador, frente al centro de la cámara, donde la cámara catódica protegida 382 se posiciona con el cátodo 384. En este caso, los sustratos se pueden calentar a 900 °C, mientras que, al mismo tiempo, el plasma de arco de ánodo remoto altamente ionizado puede establecerse en la cámara 380 mediante la descarga de arco de ánodo remoto entre el cátodo 384 en una cámara catódica 382 y los ánodos remotos 410, 412, 414 posicionados en la pared de la cámara 380. En este procedimiento, cuando la atmósfera de gas en una cámara 380 se compone de una mezcla de metano, hidrógeno y argón en el intervalo de presión de 1 a 200 mTorr y la concentración de metano en hidrógeno oscila de 0,1 a 2 % en peso, los recubrimientos de diamante policristalino pueden depositarse sobre sustratos situados en la superficie calentada de los calentadores, calentada a la temperatura de deposición que oscila de 700 a 1000 °C.

Con referencia a la Figura 13, se proporcionan ilustraciones esquemáticas de un sistema que incorpora una fuente de cátodo frío de arco de vacío para la emisión de electrones. En particular, la presente variación adopta el diseño de la fuente de cátodo frío de arco de vacío para la emisión de electrones del sistema de la Patente de los EE.UU. No. 5.269.898. El cátodo con forma de varilla 430 se monta dentro de la cámara catódica 432, que sirve como un ánodo principal para la descarga de arco catódico de vacío alimentada por el suministro de energía de arco principal 434. El cátodo 430 se conecta a la salida negativa de un suministro de energía de arco 434, y el recinto 436 de la cámara catódica 432 se conecta a la salida positiva del suministro de energía de arco 434. La salida positiva del arco principal puede conectarse opcionalmente a tierra, como se muestra con la línea discontinua en la Figura 13. Un arco es golpeado de manera repetitiva por un percutor 440, ubicado en el extremo del cátodo 430 que se sitúa de manera opuesta a la conexión al suministro de energía de arco 434. Una bobina electromagnética helicoidal 442 se monta coaxialmente con el cátodo 430 y sirve para generar un campo magnético solenoidal con líneas de flujo sustancialmente paralelas al eje del cátodo 430, con una magnitud proporcional a la corriente proporcionada por un suministro de energía de la bobina 446. Uno o más sustratos 22, sobre los cuales se depositará un recubrimiento, se disponen alrededor de la cámara catódica 432 y, opcionalmente, se montan sobre una plataforma de placa giratoria que sostiene los sustratos (no se muestra), la cual proporcionará la rotación de los sustratos durante la deposición, de ser necesario, para lograr una distribución de espesor de recubrimiento uniforme de la misma. También se representa un punto de arco 450 y una trayectoria típica 452 del mismo resultante de la influencia del campo magnético aplicado.

El punto de arco viaja por todo o parte de la longitud del cátodo 430 hacia la conexión con el suministro de energía del arco 434 antes de volver a ser golpeado. El aislante 454 impide el movimiento del punto de arco 450 fuera de la superficie evaporable deseada del cátodo 430. La bobina electromagnética 442 puede aislarse eléctricamente del circuito de arco, o puede comprender una parte del ánodo mediante una conexión a la misma, como se indica con la

5 línea de puntos 458. La bobina electromagnética 442 puede servir alternativamente como el único ánodo principal para la descarga de arco principal en la cámara catódica 432, en cuyo caso, la bobina electromagnética 442 se aísla eléctricamente de la cámara 432 y se conecta a la salida positiva del suministro de energía del arco principal 434, que se desconecta de la cámara catódica 432. Una o más fuentes de pulverización catódica con magnetrón 460 se montan a lo largo de las paredes 462 de la cámara 466 rodeada por los ánodos remotos 470. Los ánodos remotos se conectan

10 a la salida positiva del suministro de energía de arco remoto 472, mientras que su salida negativa se conecta al cátodo 430 en la cámara catódica 432. El recinto 436 de la cámara catódica 430 tiene aberturas 476 cubiertas por protecciones 478 para impedir que partículas pesadas (iones, átomos neutros y macropartículas), emitidas por el cátodo 430, lleguen al área de deposición fuera de la cámara catódica 432, pero los electrones son capaces de penetrar libremente en el área de recubrimiento a través de las aberturas 476 entre el recinto 436 y las protecciones 478. La corriente de

15 arco remoto se conduce entre el cátodo 430 dentro de la cámara catódica 432 y los ánodos remotos 470 que rodean a las fuentes de pulverización catódica con magnetrón 460 en la pared de la cámara de recubrimiento 466. El ánodo remoto se conecta a la salida positiva del suministro de energía de arco remoto 472, mientras que la salida negativa del suministro de energía de arco remoto 472 se conecta al cátodo 430 en la cámara catódica 432. El arco remoto ioniza y activa el entorno de plasma durante el procedimiento de deposición con recubrimiento de pulverización

20 catódica con magnetrón, pero también puede servir como una fuente de ionización y creación de entorno de plasma en una zona de recubrimiento durante la limpieza de iones preliminar de los sustratos, antes de iniciar el procedimiento de recubrimiento, así como para los procedimientos de implantación iónica de inmersión en plasma, nitruración iónica y deposición de recubrimiento CVD de baja presión asistido por plasma.

25 Con referencia a las Figuras 14A-14C, se proporciona una ilustración esquemática de una variación de un sistema de recubrimiento que incorpora un filtro de macropartículas. En esta variación, se adopta el diseño de la cámara catódica de la Publicación de patente de los EE.UU. No. 2012/0199070. El sistema 480 incluye la cámara del cátodo 484 que está configurada como un filtro de macropartículas. La cámara del cátodo 484 incluye un número par de conjuntos de conductos simétricamente colocados alrededor de cátodo alargado 486. La variación expuesta en las Figuras 14A y

30 14B incluye cuatro conjuntos de conductos, es decir, los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494, que forman de manera efectiva un recinto 496 alrededor del cátodo 486. Los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 definen conductos 500, 502, 504, 506 a través de los cuales los iones cargados positivamente son guiados desde la diana catódica 486 a los sustratos 22. Los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 definen un campo magnético para guiar un plasma. Los conjuntos de conductos incluyen, cada uno, un componente de soporte 510 y un componente

35 deflector 512 para el bloqueo de las macropartículas. En un ajuste, el componente deflector 512 incluye protuberancias 514 para mejorar la capacidad de filtrar las macropartículas. Los postes eléctricos 516, 518 se usan para conectarse al suministro de energía del filtro, de modo tal que los conjuntos de conducto estén eléctricamente polarizados para repeler los iones con carga positiva. Cuando los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 están polarizados de manera positiva en relación con el cátodo 486, también sirven como un ánodo principal para la descarga de arco

40 principal establecida dentro de la cámara catódica 484. Los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 también pueden aislarse y tener un potencial flotante. En este caso, la bobina electromagnética de direccionamiento de arco (no se muestra) puede servir como un ánodo principal para el cátodo 486, para el encendido de la descarga de arco principal en la cámara catódica 484, como se explicó anteriormente en relación con la realización mostrada en la Figura 14B. Con referencia a la Figura 14C, se proporciona una vista en perspectiva esquemática de un conjunto del

45 filtro y el recinto de la cámara catódica 496. El recinto del conjunto del filtro y la cámara catódica 496 está hecho con un juego de conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494, que son paralelos al cátodo 486, teniendo preferentemente una forma de varilla, pero que también puede estar hecho como una barra con cualquier sección transversal poligonal. Durante el procedimiento de deposición del recubrimiento de arco catódico filtrado, el filtro se activa eléctricamente haciendo pasar una corriente a lo largo de los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 a fin de establecer un campo

50 magnético.

Incluso con referencia a las Figuras 14A-14C, un campo magnético se crea opcionalmente pasando una corriente a través de los conjuntos de conductos, a fin de crear un campo magnético. En particular, los conjuntos de conductos adyacentes generan campos magnéticos con polaridades magnéticas opuestas. Las flechas 520, 522, 524, 526

55 indican un ejemplo de las direcciones en que pueden fluir las corrientes para crear dichos campos magnéticos. Las flechas muestran que las direcciones de las corrientes en los conjuntos de conductos vecinos son opuestas entre sí. El campo magnético generado de esta manera tiene una orientación normal a una superficie del cátodo alargado y una fuerza conductora para la guía de plasma producida por el paso de corriente a través de los conjuntos de conductos. En este modo de deposición por arco filtrado, el plasma del vapor de metal emitido desde el cátodo 486

60 pasa a través de los conductos entre los conjuntos de conducto, permitiendo así que se eliminen las macropartículas

indeseables y los grupos de vapor de metal neutros, así como que se entregue el 100 % del plasma de vapor de metal ionizado a los sustratos.

En el modo de descarga de plasma de arco ánodo remoto (RAAD), la corriente no se conduce a través de los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 y el campo magnético de extracción de plasma de vapor de metal no se genera. En este modo pasivo de los conductos, los electrones emitidos desde la superficie del cátodo 486 pueden pasar libremente a través de los conductos 500, 502, 504, 506 que conducen la corriente RAAD entre el cátodo 486 en la cámara del cátodo 484 y los ánodos remotos 530, 532 y 534 que rodean las fuentes de magnetrón 538 y 540, las cuales están posicionadas a lo largo de la pared de la cámara 506 del sistema de recubrimiento 480. Al mismo tiempo, los conjuntos de conductos 488, 490, 492, 494 sirven como una barrera que impide que las partículas pesadas, tales como los átomos, iones y macropartículas de vapor de metal, emitidos por el cátodo 486 lleguen a sustratos. El plasma RAAD ioniza y activa el entorno de procesamiento de plasma en un área de procesamiento del sistema 480, donde se posicionan los sustratos. Esto resulta en la capacidad de efectuar la limpieza del plasma iónico, la nitruración de iones de implantación y la pulverización catódica con magnetrón asistida por arco remoto (RAAMS), lo que produce propiedades avanzadas de los productos de procesamiento de plasma.

Con referencia a las Figuras 15A y 15B, se proporciona una ilustración esquemática de una variación del sistema de RAAMS. La Figura 15A es una vista lateral esquemática del sistema RAAMS, mientras que la Figura 15B es una vista lateral esquemática perpendicular a la vista de la Figura 15A. El sistema 530 incluye una cámara 532, un soporte de sustrato 534 con sustratos 536 a recubrir, cátodos principales 538a, 538b, magnetrones 540a, 540b y ánodos remotos 542a, 542b. Los cátodos 538a, 538b están situados en el lado 544 (es decir, la parte inferior) de la cámara 532 en una sección de cátodo 548 separado de la sección de recubrimiento 550 de la cámara 532 mediante una protección de espiga 552, que es impermeable para las partículas pesadas, pero permite que los electrones pasen a través del mismo hacia los ánodos remotos 542a, 542b en la sección de recubrimiento 550. La protección 552 puede ser eléctricamente flotante o puede efectuarse al terminal positivo de ya sea el suministro de energía de arco principal 554 o un suministro de energía adicional (no se muestra). El ánodo arco principal 556 se ubica en el medio de la cámara catódica 548 entre dos cátodos de arco: el cátodo 538a en un compartimento izquierdo de la cámara catódica 548 y el cátodo 538b en un compartimento derecho de la cámara catódica 548. El soporte de sustratos 534 con los sustratos 536 a recubrir se ubica entre los magnetrones 540a, 540b. Los sustratos miran al magnetrón 540a en el lado izquierdo y al magnetrón 540b en el lado derecho. Los ánodos remotos 542a, 542b se ubican por encima de los magnetrones 540a, 540b y están separados entre sí mediante un deflector de separación opcional 560. El ánodo de separación 556, el soporte de sustratos 534 con los sustratos 536 a recubrir y un deflector de separación opcional 560 dividen efectivamente la cámara 532 en dos lados (es decir, un lado izquierdo y uno derecho), impidiendo así que el chorro caliente 562a asociado con el cátodo 538a ubicado en el lado izquierdo de la cámara 532 fluya a través del lado derecho de la cámara 532 hacia el ánodo remoto 542b y fluya hacia dentro del lado izquierdo de la cámara 532 hacia el ánodo remoto 542a. El ánodo remoto 542a se acopla con el cátodo de arco 538a en el lado izquierdo del soporte de sustratos 534 y el ánodo remoto 542b se acopla con el cátodo 538b en el lado derecho del soporte de sustratos 534. El ánodo 556, el soporte de sustratos 534 y el deflector de separación opcional 560 dividen efectivamente la cámara de recubrimiento 550 en dos secciones: una sección izquierda que aloja el cátodo izquierdo 538a, el magnetrón izquierdo 540a y el ánodo remoto 542a y una sección derecha que aloja el cátodo derecho 538b, el magnetrón derecho 540b y el ánodo remoto derecho 542b. Esta división forma dos huecos de descarga estrechos o dos tramos de descarga: un hueco izquierdo que separa el magnetrón izquierdo 540a y el soporte de sustratos 534 en el lado izquierdo de la sección de recubrimiento 550 y un hueco derecho que separa el magnetrón derecho 540b y el soporte de sustratos 534 en el lado derecho de la sección de recubrimiento 550. El ancho de los huecos de descarga de separación oscila de 2 a 20 pulgadas (de 5,08 a 50,8 cm).

En un ajuste, la diana catódica se puede hacer de un metal que tiene una capacidad de gettering tal como de aleación de titanio o circonio. En este caso, la fuente emisora de electrones del cátodo protegido también sirve como una bomba de gettering de vacío que mejora la eficiencia de bombeo del sistema de recubrimiento 530. Para mejorar aún más la eficiencia de bombeo de gettering, la protección 552 que mira a la superficie de evaporación de la diana catódica 538a en la cámara catódica 550 puede enfriarse con agua y, opcionalmente, conectarse al suministro de energía de polarización de alto voltaje. Cuando la protección enfriada con agua 552 se polariza para un potencial negativo alto que oscila de -50 a -1000 V en relación con las dianas catódicas 538a y 538b, la protección 552 estará sujeta a un bombardeo iónico intenso por parte de los iones metálicos generados por el procedimiento de evaporación de arco catódico. La condensación del vapor de metal bajo condiciones de bombardeo iónico intenso es favorable para el bombeo de gases nobles como He, Ar, Ne, Xe, Kr, así como también hidrógeno. Por otra parte, el ánodo principal enfriado con agua 556 que mira a las dianas catódicas 538a, 538b también contribuye a la capacidad de bombeo mediante el aumento del área de condensación/gettering del vapor de metal.

Incluso con referencia a las Figuras 15A y 15B, se puede observar que varias fuentes de magnetrón 540 están

5 posicionadas encima de la cámara del cátodo 548 en la sección de recubrimiento 550. El soporte de sustratos 534 con los sustratos 536 se mueve a lo largo de la cámara 532, pasando los magnetrones. El punto de arco catódico 564 se mueve a lo largo de la diana catódica 566 del cátodo de arco 538 mientras es dirigido por la bobina de direccionamiento magnético 570 u otro medio de direccionamiento. La investigación experimental de este sistema
 10 reveló que el chorro estrecho de plasma 562 tiene una alta densidad de plasma que oscila de 10^{11} a 10^{13} cm^{-3} y una temperatura de electrones superior a 2 eV (que varía típicamente de 3 a 20 eV). La mayor parte de la corriente de descarga del arco de ánodos remotos fluye a lo largo de un chorro estrecho de plasma caliente 562 y tiene una densidad de corriente de arco que oscila de 0,1 mA/cm² a 100 A/cm². El resto de la sección de recubrimiento se llena mediante el plasma frío y extraño con una temperatura de electrones típicamente debajo de 3 eV y una densidad de
 15 plasma que oscila de 10^8 a 10^{11} cm^{-3} . El ancho del chorro de plasma caliente 562 es típicamente de 1 a 5 cm, mientras que se mueve con la misma velocidad que el punto de arco catódico 564 que sigue el movimiento de direccionamiento del punto de arco catódico 564 en la diana catódica 566. Se cree que la mayor parte de la corriente de arcos remotos se conduce entre el cátodo 538 en la cámara del cátodo 548 y el ánodo remoto 542 a lo largo de chorro de plasma caliente 562. A partir de la Figura 15A, también se puede observar que dos chorros de plasma calientes 562a y 562b
 20 se forman dentro de los huecos de descarga estrechos entre el magnetrón izquierdo 540a y el soporte de sustratos 534 en el lado izquierdo de la sección de recubrimiento 550 y entre el magnetrón derecho 540b y el soporte de sustratos 534 en el lado derecho de la sección de recubrimiento 550. El chorro izquierdo 562a puentea el cátodo izquierdo 538a en un compartimento izquierdo de la cámara catódica 548 y el ánodo remoto izquierdo 542a en el lado izquierdo de la sección de recubrimiento 550. El chorro derecho 562b puentea el cátodo derecho 538b en un compartimento derecho de la cámara catódica 548 y el ánodo remoto derecho 542b en el lado derecho de la sección de recubrimiento 550.

Con referencia a la Figura 16, se proporciona una ilustración esquemática de una variación de las Figuras 15A y 15B con un cátodo en uno de los compartimentos de la cámara catódica y con dos puntos de arco catódico. En esta variación, dos chorros de plasma 562a y 562b, formados entre el deflector de espiga 552 y el ánodo remoto 542
 25 encima de cada uno de los puntos de arco catódico 576a y 576b puentean las conexiones de corriente entre el cátodo 538 y el ánodo remoto 542. La dirección de la corriente de arco remoto a lo largo de los chorros 562a y 562b asociada a los puntos de arco catódico 576a y 576b se muestra a través de las flechas verticales en estos chorros. La distribución de plasma tiene máximos 578a y 578b cerca de cada uno de los puntos de arco catódico 576a y 576b se mueve a lo largo del tramo de erosión 580 en la diana catódica 566, ya por un campo magnético de direccionamiento creado por
 30 una bobina de direccionamiento ubicada más allá de la diana 582 (no se muestra) u otros medios, como se describe a continuación. En esta variación, las dimensiones de la zona de alta ionización es $A_i \sim L$ (magnetron) $\times W$ (chorro). En los sistemas alineadas horizontalmente y antes expuestos, el área de ionización es solo $A_i \sim W$ (magnetron) $\times W$ (chorro). El aumento del área de ionización de flujo de la pulverización catódica con magnetron mediante la alineación vertical del chorro de arco 562 (paralela al lado largo del magnetron 540) contra la alineación horizontal del chorro de
 35 arco 562 (paralela al lado corto del magnetron 540 como en el caso principal) es de aproximadamente L (magnetron)/ W (magnetron).

Incluso con referencia a la Figura 16, las corrientes de plasma confinadas (es decir, un chorro de plasma) que puentean el hueco de descarga entre el ánodo remoto 542 y diana catódica 566 a través de la región de recubrimiento 550, se
 40 mueven a lo largo de la dirección d_4 , mientras permanecen paralelas al lado largo de los magnetrones 540. Los extremos de los chorros de plasma confinados 562 se mueven a lo largo de la dirección d_4 , como se expone en la Figura 16. El punto de arco 576 se forma en el cátodo 538 a lo largo de la zona de erosión 580. El campo de plasma 584 en el ánodo remoto 542 y el campo de plasma 578 en la diana catódica 566 están confinados, en términos de dimensiones, en un espacio de alrededor de 1 a 5 pulgadas (de alrededor de 2,54 a 12,7 cm) a lo largo de la dirección
 45 d_4 . En un ajuste, los campos magnéticos de direccionamiento se usan para lograr el movimiento de barrido a lo largo de d_4 . En otros ajustes, este movimiento de barrido se logra moviendo mecánicamente el cátodo 538 largo de la dirección d_4 . En incluso otros ajustes, el cátodo de filamento termiónico con los electrones de emisión secundaria se mueve a lo largo de d_4 .

50 Con referencia a las Figuras 15A, 15B y 16, se proporciona un aspecto del dimensionamiento relativo de varios componentes del sistema de recubrimiento 530. El ánodo remoto 542 tiene una dimensión del ánodo remoto lineal D_a paralela a la diana catódica 538. El área horizontal de la ubicación de las fuentes de vapor 540 (es decir, los cuatro magnetrones mostrados en la Figura 15B) también es relevante. El área a lo largo de la dirección paralela al lado corto de los magnetrones 540 tiene una dimensión de la fuente de vapor lineal D_v . la diana catódica 566 tiene una dimensión
 55 de diana catódica lineal D_c paralela al ánodo remoto 542 y también paralela al lado corto de los magnetrones 540. En un ajuste, la dimensión del ánodo remoto lineal D_a , la dimensión de la fuente de vapor lineal D_v y la dimensión de la diana catódica lineal D_c son paralelas entre sí. En otro ajuste, la dimensión del ánodo remoto D_a es mayor o igual a la dimensión de la diana catódica lineal D_c , que es mayor o igual a la dimensión de la fuente de vapor lineal D_v .

60 La Figura 17 proporciona una configuración alternativa del sistema de plasma remoto utilizando un diseño de cámara

de recubrimiento por lotes coaxial con fuentes de magnetrón plano 540a, b ubicados en las paredes de la cámara y los sustratos a recubrir 536 se unen al soporte de sustratos de carrusel rotatorio 592. La cámara de recubrimiento 590 incluye un soporte de sustrato de carrusel 592 con los sustratos 536 a recubrir y un conjunto de fuentes de pulverización catódica con magnetrón plano 540a, b unido a las paredes de la cámara de recubrimiento 590 que mira a los sustratos a recubrir. La cámara de recubrimiento 590 también incluye la cámara catódica 600 con el cátodo principal 538 y el ánodo principal coaxial 556 ubicado en la parte inferior de la cámara 590 y el anillo de ánodo remoto 596 ubicado en la parte superior de la cámara 590.

La cámara catódica 600 incluye una carcasa de protección 598 con aberturas 598a, 598b que miran hacia el hueco entre los magnetrones 540 y el soporte de sustratos 592. El deflector de separación opcional 560 en la forma de un cilindro también se instala en el soporte rotatorio de sustratos 592. El ánodo 556, el soporte de sustratos 592 y el deflector de separación opcional 560 crean un hueco coaxial estrecho dentro de la cámara 590, entre los magnetrones 540 y el soporte de sustratos 592, a fin de confinar chorros calientes 562 y asegurar su posición paralela a los ejes de la cámara 590. Las aberturas 598 pueden estar ubicadas de manera coaxial al soporte del sustrato 592. El cátodo 538 tiene la forma de un anillo coaxial con la cámara de recubrimiento 590 y con el ánodo cilíndrico principal 556. De manera alternativa, varios cátodos principales 538 se instalan coaxialmente al ánodo principal 556 en una cámara catódica 548. El ánodo principal también puede servir como una superficie de condensación para mejorar la velocidad de bombeo mediante el efecto de gettering, el cual absorbe efectivamente los gases residuales dentro de una película del ánodo que se forma 556 por medio de la condensación del plasma de vapor generado por el cátodo 538. Esta configuración aumenta la densidad del plasma de arco remoto, proporcionando así una velocidad de asistencia de bombardeo iónico más intenso durante la pulverización catódica con magnetrón. En esta configuración, una zona más densa del plasma de descarga de arco remoto se crea en el hueco entre la diana magnetrónica y los sustratos a recubrir.

Con referencia a las Figuras 18A y 18B, se proporciona un ajuste con las cámaras catódicas principales separadas 548 para cada fuente de pulverización catódica con magnetrón 540. En la Figura 18A, la cámara catódica 548 se posiciona debajo de la cámara de recubrimiento 550. El magnetrón 540 se posiciona en la cámara de recubrimiento 550 inmediatamente encima de la protección 552 que separa la cámara catódica 548 de la cámara de recubrimiento 550. La fuente de arco catódico 538, como un poderoso emisor de electrones, se posiciona debajo del magnetrón 540. El tamaño de la diana catódica, que define la dimensión de la zona de direccionamiento del punto del arco, oscila de 1/4 a 2 veces el ancho de la diana magnetrónica, pero preferentemente dentro del intervalo de 0,5 a 1,5 veces el ancho de la diana magnetrónica. El ánodo principal 556 se posiciona sobre la diana catódica 566 y tiene una dimensión generalmente menor o igual a la de la diana del arco catódico 566. La bobina de direccionamiento magnético 570 se posiciona opcionalmente debajo del cátodo 538 para direccionar puntos de arco en la superficie de la diana del arco catódico 566. El ánodo remoto 542 se posiciona en una cámara de recubrimiento 550 encima del magnetrón 540, siempre que el cátodo 538, el magnetrón 540 y el ánodo 542 estén alineados generalmente a lo largo de la misma línea. El chorro de plasma de alta densidad de 562 se forma dentro de la cámara de recubrimiento 550, entre la protección 552 y el ánodo 542, a lo largo de la superficie del magnetrón 540, por encima del punto de arco catódico 602, que se mueve sobre la superficie de la diana catódica 566, por el efecto de direccionamiento magnético proporcionado por el campo magnético de direccionamiento de la bobina de direccionamiento 570. Los puntos de arco catódico 602 y el chorro de plasma 562 se alinean a lo largo de una única línea vertical paralela al lado largo del magnetrón 540, puenteando el hueco de descarga hacia el ánodo remoto 542. En esta disposición, el direccionamiento correspondiente del chorro de plasma de alta densidad 562 con la corriente del arco de ánodo remoto direccionada a lo largo de la dirección paralela al lado largo del magnetrón 540, mientras que los ejes del chorro 562 están paralelos al lado largo del magnetrón 540. El chorro de plasma 562 cruza la descarga del magnetrón frente a la diana magnetrónica, puenteando la distancia entre la protección y el ánodo remoto 542 y ioniza el flujo de átomos de metal de pulverización catódica y el entorno gaseoso en frente de la fuente de pulverización catódica con magnetrón 540 dentro del área donde el chorro de plasma 562 cruza la descarga de magnetrón. El aumento de la ionización y la activación de los átomos de pulverización catódica y las especies gaseosas en frente del magnetrón 540 se distribuye de manera pareja tanto a lo largo de la dirección paralela al lado largo del magnetrón 540 y a lo largo de la dirección paralela al lado corto del magnetrón 540. La uniformidad de la capacidad de ionización del chorro de plasma 562 a lo largo de la dirección paralela al lado largo del magnetrón 540 se logra mediante la distribución uniforme de la densidad del plasma y de la temperatura de los electrones a lo largo del chorro de plasma 562. La uniformidad de la capacidad de ionización del chorro de plasma 562 a lo largo de la dirección paralela al lado corto del magnetrón 540 se logra moviendo repetidamente el chorro 562 hacia adelante y hacia atrás por la descarga de magnetrón de un extremo del magnetrón 540 a otro mediante el desplazamiento con direccionamiento magnético del punto de arco catódico 602 en la diana de arco catódico 566.

En un ejemplo típico, la descarga de arco principal entre el cátodo 538 en la cámara catódica 548 y el ánodo principal

556 es alimentado por el suministro de energía 554a. La descarga de arco de ánodo remoto entre el cátodo 538 y el ánodo remoto 542 es alimentada por el suministro de energía 608. La resistencia de balasto 610 se instala entre el ánodo remoto 542 y la cámara de recubrimiento conectada a tierra 550, que permite el control de la caída de voltaje entre el ánodo remoto 542 y la cámara de conexión a tierra 550. Cuando se produce la microformación de arcos en las paredes de la cámara de recubrimiento 550, el interruptor electrónico 612 se cierra, haciendo un cortocircuito entre el ánodo remoto 542 y la conexión a tierra y eliminando la formación de arcos de manera efectiva, lo cual es seguido por el reencendido del arco remoto cuando la posición del interruptor electrónico 612 está abierta. El interruptor 612 también se puede abrir durante el tiempo de encendido del plasma RAAD. El encendido de RAAD puede proporcionarse mediante la aplicación de un potencial negativo de alto voltaje, ya sea al magnetrón 540 que comienza la descarga del magnetrón o, de manera alternativa, mediante la aplicación de un voltaje negativo alto al soporte de sustratos 534 que establece la descarga luminiscente en todo el hueco de descarga entre la cámara catódica 548 y el ánodo remoto 542. La descarga de alto voltaje como un medio para el encendido de RAAD se puede usar ya sea en el modo de descarga de pulso o de CC. Las dimensiones de la diana de pulverización catódica con magnetrón del magnetrón 540 son típicamente de 10 cm de ancho x 100 cm de altura. La dimensión de la diana de arco catódico 566 es típicamente de alrededor de 10 cm, casi igual al ancho de la diana del magnetrón 540. El ancho del chorro de plasma 562 es de alrededor de 3 cm. La velocidad de movimiento magnéticamente direccionado del punto de arco 602 sobre la superficie de la diana catódica 566 es de aproximadamente 1000 cm/s. En este caso, la frecuencia de repetición del direccionamiento del chorro de plasma a través de la zona de descarga de magnetrón será de aproximadamente 50 Hz. Suponiendo que la velocidad de ionización mejorada dentro del área de la descarga de magnetrón cruzada por el chorro de plasma 562 es ~30 %, la velocidad de ionización promedio del plasma de descarga de magnetrón por el chorro de plasma 562 alcanzará ~10 %, que es al menos un orden de magnitud mayor que la del flujo de pulverización catódica con magnetrón convencional. La velocidad de ionización mejorada del flujo de pulverización catódica con magnetrón resulta en un aumento de la intensidad de la asistencia con bombardeo de iones durante el procedimiento de deposición con recubrimiento de pulverización catódica con magnetrón, lo cual rinde recubrimientos que tiene una alta densidad casi teórica, bajos defectos, alta suavidad y propiedades funcionales superiores. El sistema de tratamiento con plasma y recubrimiento con vacío en línea, con el uso de una pluralidad de fuentes de magnetrón, cada uno provisto de una cámara catódica separada, se muestra en la Figura 18B.

Con referencia a la Figura 19A, se proporciona una variación avanzada adicional de los sistemas de las Figuras 14 a 18. La cuadrícula de electrodos intermedia 622 se instala en frente del magnetrón 540, lo que limita efectivamente el área del confinamiento del chorro de plasma de alta densidad 562 frente a la diana de pulverización catódica con magnetrón 540. En esta disposición, la cámara catódica 548 está encerrada dentro del recinto 628. Aunque el recinto 628 puede conectarse eléctricamente, es preferible que esté aislado desde la cámara conectada a tierra, siempre y cuando no haya ningún acoplamiento eléctrico directo entre las descargas de arco remoto y principal. El recinto 628 tiene una abertura 630 que mira al hueco de descarga o el tramo de plasma 632 entre la diana magnetrónica 634 y la cuadrícula de electrodos 622. La longitud de la abertura 630 es generalmente igual a aquella del ancho de la diana magnetrónica 634, mientras que el ancho de la abertura 630 es menor que el ancho d del hueco de descarga 632. La cuadrícula de electrodos 622 puede estar compuesta de hilos finos 638 hechos de metales refractarios escogidos de entre el grupo de W, Ta, Nb, He, Ti, Mo y acero inoxidable. Los diámetros de los hilos son típicamente de 0,01 a 2 mm. Un diámetro inferior a 0,01 mm puede resultar en la fusión del hilo en un contacto con el plasma RAAD. Un diámetro más espeso que 2 mm absorberá demasiado material de recubrimiento del flujo de pulverización catódica. Los hilos 638 se pueden disponer en una pantalla de diferentes patrones o como una matriz de hilos individuales paralelos entre sí. El electrodo de cuadrícula 622 debe ser transparente al flujo de metal de pulverización catódica con una transparencia que es mejor que el 50 %. La distancia entre los hilos vecinos 638 en una pantalla o electrodo de cuadrícula 622 es típicamente de 0,5 a 10 mm. Las distancias entre los hilos vecinos en el electrodo de cuadrícula 622 de menos de 0,5 mm no son prácticas y pueden afectar a la transparencia del electrodo de cuadrícula 622. Las distancias entre los hilos vecinos 638 en el electrodo de cuadrícula 622 mayor de 10 mm no puede tener suficientes propiedades de confinamiento de plasma para confinar el chorro de plasma a confinar 562 dentro de hueco de descarga del tramo de plasma 632. La distancia d entre la diana magnetrónica 634 y el electrodo de cuadrícula 622 es típicamente de 10 a 100 mm. Las distancias menores de 10 mm son demasiado pequeñas para confinar el chorro de arco 562, mientras que las distancias mayores de 10 cm son demasiado grandes para proporcionar un tramo estrecho que pueda comprimir el chorro de plasma, aumentando eficazmente su densidad de electrones, la temperatura de los electrones y la velocidad de ionización del flujo de pulverización catódica de metal.

El electrodo de cuadrícula 622 generalmente funciona como un ánodo intermedio. Sin embargo, también puede servir como un electrodo de ignición de plasma de descarga remota. En este último caso, el conmutador 642 conecta el polo negativo de alto voltaje de CC o el suministro de energía de pulso 644 al electrodo de cuadrícula 622. Cuando un alto voltaje negativo de CC o un potencial de polarización de pulso se aplica al electrodo de cuadrícula 622, esto enciende la descarga luminiscente proporcionando la ionización inicial dentro del hueco de descarga de plasma del arco de ánodo remoto 632, iniciando así el plasma RAAD. Después de que se enciende el plasma RAAD, el interruptor 642

puede conectar el polo positivo del suministro de energía del ánodo intermedio 646 a la cuadrícula de electrodos 622 transfiriendo la cuadrícula de electrodos 622 en el modo de ánodo intermedio, cuando la cuadrícula de electrodos 622 se vuelve un ánodo intermedio de la descarga de arco de ánodo remoto. En este caso, electrodo de cuadrícula 622 está conectado al polo positivo de la fuente de energía 646, mientras que el polo negativo está conectado al cátodo 538. En un ajuste, el electrodo de cuadrícula puede conectarse al polo negativo del suministro de energía 644 durante la operación del plasma RAAD, mientras que el polo positivo se conecta al cátodo 538. En este caso, el potencial de la cuadrícula de electrodos 622 será negativa en relación con el cátodo 538, pero el potencial de la cuadrícula de electrodos 622 no puede ser menor que el cátodo 538 más de dos veces de la caída de voltaje entre el cátodo 538 y el ánodo principal 556. Electrodo de cuadrícula 622 también se puede usar para aislarse de los otros componentes de la configuración de cámara de recubrimiento. En tales casos, el potencial de la cuadrícula de electrodos 622 se fijará en un valor potencial flotante determinado por la densidad del plasma y la temperatura de los electrones en el plasma RAAD. La densidad del plasma dentro del hueco de descarga 632 se puede aumentar a un nivel extremadamente alto mediante la reducción del ancho del hueco de descarga y aumentando la corriente del arco de ánodo remoto. Esto permite el uso de la diana de pulverización catódica 540 en el procedimiento de pulverización catódica de diodo sin el realce magnético, como se requiere en el procedimiento de pulverización catódica con magnetrón.

La densidad de la corriente de arco remoto en el chorro 562 en el hueco de descarga de arco remoto definido entre la cuadrícula del ánodo 622 y el magnetrón 540 oscila de 0,1 a 500 A/cm². Una densidad de corriente remota inferior a 0,1 A/cm² no es suficiente para proporcionar un nivel deseable de ionización del flujo de pulverización catódica con magnetrón. Las densidades de corriente de arco remoto de más de 500 A/cm² requieren demasiada energía del suministro de energía de descarga de arco remoto, lo cual no resulta práctico para las aplicaciones. La densidad de alta corriente de la descarga de arco remoto (es decir, el chorro (562) dentro del hueco de descarga definido entre la cuadrícula del ánodo 622 y el magnetrón 540 puede lograrse con el uso de suministros de energía de CC 646 y/o 608, que pueden proporcionar una corriente de CC que oscile de 10 a 2000 A para el ánodo remoto 542 y/o el ánodo de cuadrícula 622 o, de manera alternativa, mediante el uso de suministros de energía de pulso que pueden aplicar pulsos de voltaje positivo al ánodo remoto 542 y/o el ánodo de cuadrícula 622. Los pulsos de voltaje positivo pueden oscilar de 500 a 10.000 V y los pulsos de corriente asociados pueden oscilar de 1.000 a 50.000 A.

Con referencia a la Figura 19B, se proporciona una variación del sistema de la Figura 19A. Los hilos 638 en la matriz de electrodos de cuadrícula 622 se posicionan en paralelo entre sí y respecto del lado corto del magnetrón 540. Cada hilo 638 se conecta al ánodo remoto 542 mediante el condensador 640 y la derivación de la resistencia 642 mientras que los diodos aseguran la dirección de la corriente hacia el elemento de hilo 638. Durante la operación, antes de que se encienda la descarga remota, los condensadores 640 se cargan al máximo voltaje de circuito abierto del suministro de energía de arco de ánodo remoto 608. Esta disposición dispara el encendido en cascada de la descarga de arco remoto mediante el encendido del arco remoto, primero entre el cátodo 538 y el primer hilo individual 638 posicionado más cerca del cátodo 538, seguido por la propagación de la descarga de arco remoto secuencialmente a través de todos los electrodos de hilo individuales intermedios 638 de la matriz de la cuadrícula de electrodos 622 hacia el ánodo remoto 542. Después de la fase de encendido, los condensadores 640 se descargarán y el potencial de cada cable 638 y de toda la matriz de la cuadrícula de electrodos 622 se determinará mediante los resistores de derivación 642. Si se extingue la descarga de arco de ánodo remoto, los condensadores 640 se cargará de nuevo hasta el máximo voltaje de circuito abierto del suministro de energía 608 con la cascada de encendido repetida automáticamente. De manera alternativa, el encendido se inicia mediante el sistema de control. Esta estrategia también se puede aplicar al sistema de magnetrones múltiples similar al que se muestra en las Figuras 16 y 18B. En este caso, los electrodos de encendido intermedios de la disposición de encendido en cascada pueden posicionarse entre dentro de los agujeros entre las respectivas fuentes de pulverización catódica con magnetrón.

Con referencia a la Figura 19C, se proporciona una avanzada adicional del sistema de recubrimiento de la Figura 19A. Los electrodos de RF acoplados de manera capacitiva 648, 650 se posicionan en ambos extremos del cátodo 652 y el extremo del ánodo remoto 654 de la columna de la descarga de arco remoto 562. El generador de RF y la red de emparejamiento se instalan en serie con electrodos de RF 648 para activar el chorro de plasma 562 mediante la superposición de las oscilaciones de RF a lo largo de chorro de plasma 562. La frecuencia de las oscilaciones puede variar desde 10 kHz a 500 MHz. En un ajuste, la frecuencia del generador oscila entre 500 kHz y 100 MHz. El generador de RF comúnmente usado de 13,56 MHz es adecuado para este propósito. Cuando se crean oscilaciones intensas de RF dentro del chorro de plasma 562, la densidad del plasma, la temperatura de los electrones y, posteriormente, la velocidad de ionización del plasma gaseoso de pulverización catódica con magnetrón aumenta, resultando así en un aumento en la eficiencia de la ionización de descarga de arco de ánodo remoto y las capacidades de activación. Esto mejora aún más las propiedades y el rendimiento de los recubrimientos y las superficies tratadas con plasma mediante el plasma de descarga RAAMS. En otra variación, como se ilustra en la Figura 19C, un generador de alto voltaje pulsado o un generador de RF pulsada 656 se usa en lugar de un generador de RF de onda continua, proporcionando así pulsos de RF o un alto voltaje unipolar para encender la descarga RAAMS, así como también pulsos de alta

corriente de alto voltaje superpuestos durante el procedimiento de deposición de recubrimiento. La frecuencia de repetición de la alta corriente de alto voltaje o pulsos de RF oscila de 1 Hz a 100 kHz.

La Figura 19D proporciona una vista en perspectiva del módulo RAAMS con una cuadrícula de electrodos. La cámara catódica 548 con el cátodo principal (no se muestra) y el ánodo principal (no se muestra) se posiciona debajo de los magnetrones de pulverización catódica con magnetrón 540. La cuadrícula de electrodos 622 se posiciona en frente del magnetrón 540. La descarga de arco remoto, es decir, el chorro 562, se enciende entre el cátodo principal (no se muestra) en una cámara catódica 548 y el ánodo remoto 542. El chorro de arco remoto 562 entra desde una abertura en la cámara catódica 548 en el hueco de descarga de arco remoto creado entre el electrodo de cuadrícula 622 y la superficie de pulverización catódica con magnetrón 540.

Con referencia a la Figura 19E, se proporciona un esquema de un sistema de otro sistema de recubrimiento de ánodo remoto. La jaula de plasma del arco de ánodo remoto 622 puede crearse en frente de la diana magnetrónica 634 de la fuente de vapor magnetrónico 540, como se muestra de manera ilustrativa en la Figura 19E. La descarga de arco remoto puede establecerse entre el cátodo de arco principal (no se muestra) en la cámara catódica 548 y la jaula del ánodo (es decir, la cuadrícula 622) y/o el ánodo remoto superior 542. En esta realización, el plasma de arco de ánodo remoto corre de la abertura 630 en la cámara catódica 548 a lo largo del lado largo de la diana magnetrónica 634 hacia el ánodo de cuadrícula 622 y/o el ánodo remoto superior 542. Si bien el ánodo remoto de la jaula-cuadrícula 622 puede hacerse con hilos alineados en muchos patrones diferentes, la realización que se muestra en la Figura 19E utiliza la jaula del ánodo remoto 622 compuesta de una matriz de hilos rectos paralelos al lado largo de la diana magnetrónica 634.

Con referencia a la Figura 19F, que es una sección transversal del sistema que se muestra en la Figura 19E, se proporciona una vista esquemática de un sistema que usa una matriz de hilos. Esta matriz de los hilos paralelos consiste en la matriz externa de los hilos 622a que forma un límite externo de la cuadrícula-jaula del ánodo remoto 622. El chorro de plasma de arco ánodo remoto está confinado dentro de la jaula del ánodo que se forma con esta matriz externa de hilos de la jaula del ánodo 622a. También puede consistir opcionalmente en la matriz de los hilos internos 622b, que se posicionan dentro de la cuadrícula-jaula del ánodo 622. Cuando el potencial de pulso o CC positivo se aplica a la cuadrícula-jaula del ánodo en referencia al cátodo en la cámara catódica 548, la vaina del plasma anódico se forma alrededor de cada hilo de la matriz de los hilos externos 622a y los hilos internos 622b. La eficiencia de ionización dentro de la vaina de plasma anódico es mayor que la del plasma de fondo, lo que da como resultado la mejora de la velocidad de ionización del flujo de pulverización catódica con magnetrón, contribuyendo, por tanto, a una mejora adicional de las propiedades de recubrimiento. El papel de los hilos internos 622b también es desviar las partículas cargadas, como los electrones y los iones positivos, ondulando sus trayectorias, creando un efecto de péndulo, aumentando la longitud de las trayectorias de las partículas cargadas y efectivamente atrapando las partículas cargadas dentro de la cuadrícula-jaula del ánodo 622, aumentando, por tanto, las probabilidades de ionización del flujo de pulverización catódica con magnetrón. Esta estrategia para el confinamiento del plasma también se puede usar sin la necesidad de un confinamiento magnético. Esto permite usar la diana de pulverización catódica en un modo de pulverización catódica de diodo sin imanes, mientras que el plasma de arco de ánodo remoto de alta densidad queda confinado electrostáticamente dentro de la cuadrícula-jaula del ánodo 622. La distancia característica entre los hilos vecinos en la caja de cuadrícula del ánodo 622 que se muestra en la Figura 19E oscila entre 0,5 y 30 mm. El espesor de cada hilo oscila típicamente entre 50 y 3000 micrómetros. La corriente de densidad de corriente de arco de ánodo remoto a lo largo de la diana 634 en paralelo a su lado largo de la abertura de la cámara catódica 634 oscila de 0.1 a 500 A/cm². La corriente de arco de ánodo remoto puede proporcionarse ya sea con suministros de energía de CC o suministros de energía de pulso. La sección transversal de la fuente de pulverización catódica con magnetrón 540 rodeada por la caja de cuadrícula del ánodo 622 se muestra de manera ilustrativa en la Figura 19F. La descarga de magnetrón 647 se establece por encima de la diana magnetrónica, infligiendo un flujo atómico de metal de pulverización catódica con magnetrón 649. La caja del ánodo consiste en la matriz externa 622a y la matriz de hilo anódico interna 622b. Cuando el hilo se energiza mediante la aplicación del potencial positivo contra el cátodo en una cámara catódica (no se muestra), la vaina de plasma anódico con la velocidad de ionización realizada se establece alrededor de cada uno de los hilos de la cuadrícula-jaula del ánodo 622. Las trayectorias de las partículas cargadas (electrones y iones positivos) se desvían cuando la partícula se acerca a la vaina del plasma anódico que rodea la matriz de los hilos 622a y 622b. En un ajuste, los hilos de la cuadrícula-jaula del ánodo 622 están hechos de metales refractarios tales como W o Ta y su temperatura se mantiene en un intervalo de 500 a 2500 °C, lo que permite efectivamente reevaporar los átomos de metal del flujo de la pulverización catódica con magnetrón, que pueden pegarse a la superficie del hilo. Se cree que la alta velocidad de ionización dentro de la cuadrícula-jaula del ánodo hará posible operar la fuente de vapor de pulverización catódica en un intervalo de presión debajo de 0,5 mTorr, e incluso sin gas noble tal como argón o criptón, lo que así elimina las inclusiones perjudiciales de los átomos de gases nobles en un entramado de recubrimiento.

60

Con referencia a la Figura 20, se proporciona una variación en la que la fuente de arco catódico para la emisión de electrones tiene un cátodo no consumible. El conjunto catódico 660 incluye un cátodo enfriado con agua con una forma de cilindro o una cavidad rectangular. La cavidad rectangular 662 incluye una superficie de evaporación y emisión de electrones interna 669 y el ánodo principal 666 que consiste generalmente en un inserto cilíndrico o rectangular 668 unido a la placa de ánodo 670. El inserto del ánodo 668 se extiende dentro de la cavidad del cátodo 662. El ánodo 666 se hace con metales refractarios escogidos de entre el grupo de W, Ta, Nb, Hf, Ti, Cr, Mo y acero inoxidable. La placa del ánodo 670 está aislada del cátodo mediante espaciadores cerámicos 672. El ánodo principal 666 se une al recipiente de transferencia del plasma enfriado con agua 676 mediante los espaciadores 678, teniendo una pequeña sección transversal que proporciona una alta resistencia térmica entre el recipiente de plasma 676 y el ánodo principal 666. El recipiente de plasma 676 incluye la abertura 680 que mira al cátodo 538 a lo largo del inserto del ánodo tubular 668 en el lado del cátodo 538 y la abertura 682 que mira al hueco de descarga entre la cuadrícula de electrones 622 y la fuente magnetrónica 540 en el lado de la cámara de recubrimiento 550. La longitud de la abertura 682 es generalmente igual a aquella del ancho de la diana magnetrónica 634, mientras que el ancho de la abertura 682 es menor que el ancho d del hueco de descarga 632. Los espaciadores 678 pueden estar hechos de metal refractario. En este caso, el recipiente de plasma 676 está conectado eléctricamente al ánodo principal 666. De manera alternativa, los espaciadores 678 pueden estar hechos de cerámica no conductora, haciendo que el recipiente de plasma 676 se aisle eléctricamente desde el ánodo principal 666. En cualquier caso, los espaciadores 678 deben tener una pequeña sección transversal que proporciona una alta resistividad térmica entre el recipiente de plasma enfriado con agua 662 y el ánodo principal 666. En la operación, el ánodo principal se calienta porque la corriente del arco alcanza la temperatura cuando se produce la reevaporación del metal transferido desde el cátodo, reciclando de manera efectiva la evaporación del metal catódico desde la superficie catódica interna 669 en la descarga del arco catódico.

El recipiente del cátodo 662 se forma típicamente con un metal que tiene una temperatura de fusión relativamente baja y una presión de vapor de alta saturación. Los ejemplos de tales metales incluyen, entre otros, Cu, Al, bronce y otras aleaciones de baja temperatura. De manera alternativa, el recipiente del cátodo 662 puede estar hecho de cobre, pero su evaporación interna y la superficie de emisión de electrones 669 deben estar cubiertas con una capa fina de un metal con una baja temperatura de ebullición (por ejemplo, Zn, Cd, Bi, Na, Mg, Rb). Los metales de evaporación de baja temperatura se vuelven a evaporar fácilmente mediante el ánodo principal caliente cuando su temperatura es de 600 a 1100 °C. La superficie interna enfriada por agua del recipiente del plasma 676 también puede funcionar como una superficie de condensación, impidiendo efectivamente que el flujo de los átomos catódicos fluya hacia dentro de la sección de la cámara de recubrimiento 550. Se debe apreciar que las variaciones de las Figuras 18-20 también se pueden usar sin la cuadrícula del electrodo 622. En este caso, la abertura de la cámara catódica 548 que mira a la cámara de recubrimiento 550 debe posicionarse cerca de la superficie de la diana magnetrónica 634, mirando al área de la descarga de magnetron, donde la densidad de los átomos de pulverización catódica es más alta.

Las figuras 21A y 21B proporcionan configuraciones alternativas de los sistemas de plasma remotos. Con referencia a la Figura 21A, el sistema de recubrimiento 670 incluye un soporte de sustratos 672 posicionado entre la fuente de pulverización catódica con magnetron 674 y el ánodo 676. El sistema de recubrimiento 670 también incluye la cámara catódica 678 que es del diseño expuesto anteriormente. Esta configuración aumenta la densidad del plasma de arco remoto, proporcionando así una velocidad más alta de asistencia de bombardeo iónico durante la pulverización catódica con magnetron. Con referencia a la Figura 21B, el sistema de recubrimiento 680 incluye el ánodo 682 que se compone de hilos finos. El ánodo 682 se instala entre la diana magnetrónica 684 y el soporte de sustratos 686. El sistema de recubrimiento 680 también incluye la cámara catódica 688 como se expuso anteriormente. En esta última configuración, una zona más densa del plasma de descarga de arco remoto se crea en el hueco entre la diana magnetrónica y los sustratos a recubrir.

Un conjunto de recubrimiento, incluyendo el plasma de descarga de arco de ánodo remoto (RAAD) o la descarga de arco, se puede confinar de manera magnetostática en la proximidad del cátodo magnetrónico y en frente de la diana magnetrónica usando una trampa magnética hecha con un campo de confinamiento magnético generado por bobinas magnéticas posicionadas de manera estratégica fuera de la cámara de vacío y fuera del área de pulverización catódica con magnetron, en lugar de una trampa electrostática hecha con un ánodo de cuadrícula posicionado en frente de la diana magnetrónica. Una trampa magnética se puede crear mediante una configuración de media-cúspide de campo magnético donde el lado convergente de la cúspide mira al sustrato a recubrir; el campo magnético se "pinza" hacia el sustrato a recubrir. Esta configuración de trampa magnética, también conocida como espejo magnético, efectivamente refleja los electrones de regreso a la diana magnetrónica, impidiendo que haya pérdidas de difusión de la descarga de arco, el plasma RAAD, desde el área adyacente a la diana magnetrónica. De manera alternativa, el plasma de arco puede quedar atrapado dentro de un área de campo magnético de bucle cerrado a lo largo de uno o dos lados largos de la diana magnetrónica.

Con referencia a la Figura 22A, que muestra una vista en sección transversal del conjunto de plasma, el plasma RAAD

es confinado por la trampa de espejo magnético dentro de la media cúspide creada entre las líneas del campo magnético convexas de las bobinas magnéticas de confinamiento rectangulares 578 y 579 y la diana magnetrónica 634. En este diseño, ambos magnetrones planos con dianas rectangulares o magnetrones rotatorios con dianas cilíndricas pueden usarse como fuentes de pulverización catódica. De manera alternativa, una diana catódica sin imanes también se puede usar como una fuente de pulverización catódica para la pulverización catódica de diodo.

La fuente de pulverización catódica con magnetrón 540 queda encerrada en una carcasa 545 y un par de bobinas magnéticas confinadas 578 y 579 se posicionan en lados opuestos del magnetrón 540. El módulo RAAMS está equipado con una brida 546 para la unión a la cámara de recubrimiento. Cada una de las bobinas magnéticas de confinamiento rectangulares 578 y 579 tiene un par de conductores lineales paralelos al lado largo de la diana magnetrónica 634, los conductores lineales frontales 578A y 579A adyacentes a los sustratos a recubrir en la cámara de recubrimiento y los conductores lineales traseros 578b, 579b en sentido contrario al sustrato. Los conductores lineales frontales y traseros se conectan por medio de conductores de cierre perpendiculares al lado corto de la diana magnetrónica 634, creando, por consiguiente, una bobina. Las bobinas magnéticas de confinamiento 578 y 579 se configuran en una polaridad opuesta, por ejemplo, la dirección de la corriente en el conductor lineal frontal 578a es opuesta a la dirección de la corriente en el conductor lineal frontal 579a. Las bobinas de confinamiento se posicionan de modo tal que las líneas del campo que emanan de su centro cruzan la superficie de la diana magnetrónica. En esta configuración de bobinas magnéticas, la media cúspide magnética se crea entre las líneas de fuerza magnéticas convexas 589 y la diana magnetrónica 634. El plano de las líneas de fuerza magnética 589 es perpendicular al plano de la diana magnetrónica 634, ya que las mismas convergen hacia los sustratos a recubrir en la cámara de recubrimiento. El campo magnético, debido a un cátodo de pulverización catódica con magnetrón 585 se mezcla con las líneas del campo magnético 589 que confinan una descarga de arco 562, las cuales se reflejan en un punto de convergencia 571.

En referencia a las Figuras 22B y 22C, un par de fuentes de magnetrón desequilibradas acopladas 545 se instalan de manera opuesta entre sí. En este caso, los sistemas magnéticos de los magnetrones 545 se pueden configurar en una configuración tipo espejo que se muestra en la Figura 22B, cuando los polos de los campos magnéticos en frente de las dianas magnetrónicas son los mismos y ya sea que se trate del polo norte o sur. Esta polaridad de los sistemas magnéticos también se nombra como una polaridad emparejada. De manera alternativa, la configuración del campo magnético de dos fuentes de magnetrones desbalanceadas acopladas y opuestas 545 puede desemparejarse como se muestra en la Figura 22C. En ambos casos, la polaridad del campo magnético creado por un par de bobinas de enfoque de confinamiento de plasma 578, 579 tiene que ser la misma que la polaridad del campo magnético creado por los imanes del magnetrón 545. El plasma magnetrónico está más dispersado en una configuración tipo espejo que se muestra en la Figura 22B, en comparación con un flujo de plasma más denso y más concentrado en una configuración que se muestra en la Figura 22C.

La vista lateral del módulo RAAMS con confinamiento magnético se muestra esquemáticamente en la Figura 22D. Esta configuración del módulo RAAMS es similar a la que se muestra en la Figura 19A, excepto por las campanas posicionadas en la parte inferior y superior del área del plasma RAAD, a lo largo de la diana magnetrónica 634. El soporte de sustratos 534 con los sustratos 536 mira al chorro de plasma 562. Un suministro de energía de CC 851 se usa para alimentar el cátodo. El polo positivo del suministro de energía 851 puede estar conectado a tierra o, de manera alternativa, conectado al ánodo remoto 8a mediante un interruptor 853. La campana del cátodo 18b se instala en la parte superior de la protección de la cámara catódica 18 y se une al chorro de entrada de la pared conectada a tierra con la diana magnetrónica 634, mientras que la campana del ánodo 8b rodea al ánodo remoto 8a en frente de la cámara del ánodo 8. La campana del cátodo 18b y la campana del ánodo 8b cruzan el borde corto del área de erosión de la diana magnetrónica 634 (el circuito) y tienen sus aberturas posicionadas más allá del límite del área de erosión del borde corto dentro de la diana magnetrónica 634. La cámara catódica 1a y la protección de la cámara catódica 18 incluyen un ánodo de arco principal 5, un cátodo de arco principal 4, una bobina magnética de direccionamiento 15 y un punto de arco catódico 66. El arco principal en una cámara catódica 1a es alimentado por el suministro de energía del arco principal 10, mientras que el chorro de plasma 562 es alimentado por el suministro de energía del arco remoto 11. La bobina magnética de direccionamiento 15 dirige el punto de arco catódico 66 en la superficie frontal de la diana catódica. En esta vista, solo se muestra una bobina magnética de confinamiento 578 con el conductor lineal frontal 578a y el conductor lineal trasero 578b. La dirección de la corriente a lo largo de los conductores de la bobina magnética 578 se muestra mediante la flecha. En la operación, el chorro de plasma RAAD 562 entra a la campana catódica 18b a través de la abertura 18a en el recinto de la cámara catódica 18, cruzando el campo magnético magnetrónico en el área del lado corto del tramo de erosión de la diana magnetrónica, y penetra aún más en el área de erosión magnetrónica paralela a los lados largos de la diana magnetrónica, donde queda confinado dentro de la media cúspide magnética 571 (Figura 22A) por encima de la diana magnetrónica 634. Este confinamiento se debe al efecto del reflejo de espejo magnético mediante las líneas de fuerza magnética convexas convergentes 589 que reflejan efectivamente los electrones de regreso a la trampa de plasma de creación

de media cúspide magnética para el plasma RAAD. La conexión del chorro del arco 562 al ánodo remoto 8a en la cámara del ánodo 8 se fija mediante la campana del ánodo 8b. La dirección de las líneas de fuerza magnética 589 generada por las bobinas de confinamiento 578 y 579 debe coincidir con la dirección de las líneas de fuerza magnética magnetrónica 585, que se muestra en la Figura 22A, creada por el sistema magnético magnetrónico posicionado
5 detrás de la diana magnetrónica 634. La campana catódica 18b y la campana anódica 8b permiten que el chorro de plasma de arco remoto 562 que cruza las barreras magnéticas, creado por el campo magnético magnetrónico cerca del área de erosión de los lados cortos de la diana magnetrónica 634 y penetran en el área de la zona de confinamiento de cúspide magnética 571. La configuración de espejo magnético del confinamiento de plasma RAAD pueden combinarse con la cuadrícula anódica que se muestra en la Figura 19, combinando el confinamiento electrostático y
10 magnetostático del plasma, que pueden mejorar aún más la capacidad de confinamiento de la trampa de plasma en frente de la diana magnetrónica, mediante la imposición del potencial positivo de confinamiento del plasma de arco a lo largo de las líneas de fuerza magnética que rodean el área de trampa de plasma de arco de cúspide magnética 571 y, específicamente, en el extremo de las líneas de campo magnético "pinzadas", lo que aumentará el reflejo de los iones de regreso al área de la diana magnetrónica 634 sellando efectivamente la trampa de plasma de cúspide
15 magnética 571.

En una variación de la presente realización, la Figura 22E muestra una trampa magnetostática/electrostática híbrida para el confinamiento del plasma RAAD con un cátodo 540. Los electrodos de hilo 638, que forman la cuadrícula anódica, deberían tener preferiblemente una forma que repita la forma de las líneas de fuerza magnética 589 de las bobinas 578 y 579 que forman el borde de la cúspide magnética 571 en frente de la diana magnetrónica 634. Esta trampa anódica cargará efectivamente el borde de la cúspide magnética con un potencial "anódico" positivo alto que mejorará el confinamiento del plasma de arco remoto dentro del área de la trampa de cúspide magnética 571 y aumentará la concentración de especies de plasma en el sustrato 536.
20

25 La Figura 22F muestra una variación de la configuración que se muestra en la Figura 22D, donde el suministro de energía del cátodo es un suministro de energía de RF 849. La Figura 22G muestra una variación de la configuración que se muestra en la Figura 22D, donde el suministro de energía del cátodo es un suministro de energía de pulso de CC 800.

30 Según la presente realización, la Figura 23 muestra la vista en perspectiva del módulo vertical RAAMS con el confinamiento de espejo magnético del plasma RAAD usando las bobinas 578 y 579 para crear la cúspide magnética 571 en frente de la diana magnetrónica 634 y el cátodo 540. El cátodo magnetrónico tiene un borde largo 540d y un borde corto 540c. La campana catódica 18b y la campana anódica 8B puentean el chorro de plasma de arco remoto a través de la barrera magnética alrededor de la parte inferior y los lados cortos superiores de la diana magnetrónica
35 634 y permiten que el plasma RAAD sea transferido a la cúspide magnética 571 sin pérdidas por difusión.

Esta estrategia también se puede aplicar al sistema de magnetrones múltiples similar al que se muestra en la Figura 18. En un ajuste que se muestra en la Figura 24A, se proporciona el sistema en línea modular 10 comprende un conjunto de módulos RAAMS con confinamiento de espejo magnético de plasma RAAD previamente mostrado en las
40 Figuras 22 y 23. Los módulos RAAMS se configuran en línea, de manera opuesta entre sí, mientras que un soporte de sustratos 534 con los sustratos a recubrir 536 se posiciona entre dos filas de módulos RAAMS con la capacidad de efectuar un movimiento oscilante y/o lineal. Para lograr la configuración de cúspide magnética del campo magnético en cada uno de los módulos RAAMS, la polaridad de las bobinas de confinamiento de plasma debe ser opuesta en cada par de las bobinas a ambos lados de la fuente de pulverización catódica con magnetrón. La polaridad de las
45 bobinas de confinamiento debe coincidir con La polaridad de los imanes permanentes de la fuente de pulverización catódica con magnetrón, siempre que la dirección del campo magnético de confinamiento de plasma creado por la bobina de confinamiento magnético es la misma que una dirección del campo magnético magnetrónico en el mismo lado de la diana magnetrónica cuando se posiciona la bobina. Por ejemplo, la dirección de la corriente en el conductor lineal frontal 578a de la bobina 578 es opuesta a la dirección de la corriente en el conductor de corriente frontal 579a en el lado opuesto del magnetrón 540. Además, la polaridad de las fuentes magnetrónicas vecinas también debe ser opuesta entre las mismas. En esta alineación, el chorro de plasma RAAD 562 quedará confinado dentro del área de cúspide magnética 571 adyacente a la diana magnetrónica, proporcionando una velocidad de ionización y activación mejoradas del flujo de pulverización catódica con magnetrón, así como también el plasma gaseoso de la cámara. Esto resultará en una alta velocidad de deposición y densificación de los recubrimientos depositados en los sustratos a
55 recubrir 536 en el carro de soporte de sustratos 534. El campo de cúspide magnética de salida de los módulos opuestos en el sistema en línea 10 puede tener la misma polaridad (que se muestra en la Figura 24B) o la polaridad opuesta a sus contrapartes en el lado opuesto del sistema en línea. Cuando los módulos opuestos que se miran entre sí tienen la misma polaridad de las cúspides magnéticas de salida, el plasma RAAMS se dispersará más, expandiéndose sobre áreas más largas de la zona de recubrimiento dentro de la cámara 10. En este caso, el plasma
60 RAAMS se distribuye de manera más uniforme a lo largo de la ruta del carro de soporte de sustratos 534 con los

sustratos a recubrir 536. En este caso, la energía transmitida desde el plasma hacia los sustratos a recubrir también se reduce mediante la dispersión del flujo de partículas energéticas sobre el área más grande. De manera alternativa, la polaridad de las cúspides magnéticas de salida de los módulos RAAMS puede ser opuesta. En este caso, el plasma RAAMS generado por los módulos opuestos en el sistema en línea 10 se concentra en el área entre los módulos opuestos que se miran entre sí. En este caso, la distribución del plasma RAAMS largo de la cámara en línea 10 es menos uniforme con la densidad máxima de plasma a lo largo de los ejes de cada par de las fuentes magnetrónicas opuestas 540 que se miran entre sí. En este caso, el flujo de las partículas energéticas que llegan a los sustratos a recubrir 536 es mayor a lo largo de los ejes de las fuentes magnetrónicas opuestas, lo que resulta en una mayor velocidad de deposición y una mayor temperatura de deposición de los sustratos a recubrir en el área cerca de los ejes de las dianas magnetrónicas.

El mapa de líneas de fuerza magnética en la configuración en línea, calculado mediante el uso del procedimiento de modelado de elementos finitos se muestra en las Figuras 24C, D y E. En este diseño del sistema, el campo magnético magnetrónico se ha modelado usando un par de conductores de corriente 541 posicionados detrás de la diana magnetrónica 634. La polaridad del campo magnético se refleja en el lado opuesto del sistema en línea, por ejemplo, los módulos opuestos que se miran entre sí tienen la polaridad opuesta de las cúspides magnéticas de salida, formando una configuración de campo magnético emparejada magnéticamente. En la Figura 24C, la densidad de corriente en los conductores lineales frontales 578A y los conductores lineales de cierre 578b de las bobinas de confinamiento magnético 578 es de $1,2 \times 10^6$ A/m², la densidad de corriente en los conductores lineales 541a y 541b, simulando el sistema magnético a base de imanes permanentes del magnetrón 540, es de 2×10^6 A/m². Las direcciones de las corrientes en los conductores lineales se muestran con las marcas de cruz y puntos, con el punto, por ejemplo, 541a, indicando el flujo de la corriente hacia fuera del papel, y la cruz, por ejemplo, 541b, indicando el flujo de la corriente hacia dentro del papel. En esta configuración, se crea la descarga de magnetrón en el área 585 adyacente a la diana magnetrónica 634. La cúspide magnética 571 se forma frente a la diana magnetrónica 634 entre los conductores lineales frontales de las bobinas de confinamiento magnético 578 y la diana magnetrónica 634. Se puede observar que los haces magnéticos fuertes 573 se forman a lo largo del plano de simetría de las fuentes magnetrónicas opuestas 540. Los haces magnéticos 573a y 573b, asociados con los magnetrones vecinos, se dirigen en sentido contrario entre sí. Cuando las corrientes en las bobinas magnéticas de confinamiento aumentan, la cúspide magnética 571 se vuelve más definitiva, volviéndose más estrecha y filosa hacia el lado opuesto del sistema, como se ilustra en la Figura 24D, en la que se muestra el mapa magnético en la misma configuración que en la Figura 24C, pero con densidades de corriente de 2×10^7 en los conductores lineales de las bobinas de confinamiento 578 y 579; y 2×10^6 en los conductores lineales del campo magnético magnetrónico simulado 541. En este caso, las cúspides magnéticas 571 convergen hacia el lado opuesto del sistema. En comparación, el mapa magnético del sistema en línea con magnetrones opuestos 540 con una polaridad magnética no emparejada, pero sin las corrientes en las bobinas de confinamiento se muestra en la Figura 24E. En este ejemplo, las corrientes en los conductores lineales 541 que simulan el sistema magnético magnetrónico son 5×10^6 A/m². Se puede observar que, en este caso, las cúspides magnéticas 571 no se forman frente a los magnetrones 540, en lugar de eso, las líneas del campo magnético divergen desde la diana magnetrónica hacia el lado opuesto del sistema. Al mismo tiempo, los haces magnéticos 573 siguen formándose a lo largo del plano de simetría de las fuentes magnetrónicas opuestas 540. Los haces magnéticos 573 transportan el plasma de pulverización catódica de metal ionizado desde las dianas magnetrónicas hacia los sustratos a recubrir, que están posicionados en el área de recubrimiento entre las dos filas opuestas de las fuentes magnetrónicas 540.

En una variación de este ajuste, la Figura 24B muestra esquemáticamente la vista en planta del sistema en línea híbrido que emplea tanto el confinamiento magnetostático como el confinamiento electrostático del plasma RAAD. El electrodo de hilo 638 se repite para cada cúspide magnética.

En un ajuste adicional, se proporciona la Figura 25A, que muestra el procedimiento RAAMS con dos chorros de arco remoto que se propagan a lo largo de los lados largos del área de descarga de magnetrón. En este caso, la descarga de arco remoto se transporta desde la cámara catódica 18 a lo largo de las campanas catódicas 18a y 18b en una de dos porciones de lado largo de la descarga de magnetrón 667a y 667b. La cámara catódica 1a y la protección de la cámara catódica 18 encierran un ánodo de arco principal 5, un cátodo de arco principal 4, una bobina magnética de direccionamiento 15 y un punto de arco catódico 66. En este caso, dos chorros de plasma de arco remoto separados 562a y 562b se forman a lo largo de los lados largos 667a y 667b de la descarga de magnetrón 667. La penetración de la corriente de arco a lo largo de la barrera magnética de la porción de lado corto de la descarga de magnetrón 667c en una de las porciones de lado largo de la descarga de magnetrón 667a o 667b se proporciona bajo las campanas catódicas 18a y 18b que tienen una altura típicamente igual o menor que el espesor de la descarga de magnetrón. El ancho de cada campana catódica 18a y 18b es menor que o igual al ancho de la zona de erosión del circuito del magnetrón, paralela al lado largo de la diana magnetrónica 634. Típicamente, la altura de la campana oscila de 10 a 50 mm. La campana doble idéntica se proporciona para transportar el plasma de arco remoto a lo largo

de la barrera magnética de la porción de lado corto de la descarga de magnetrón 667d en el lado de los ánodos remotos 9a y 9b instalados en las campanas de ánodos individuales 8a y 8b. El arco principal en la cámara catódica 1a es alimentado por el suministro de energía 10, mientras que cada arco remoto 562a y 562b es alimentado por los suministros de energía separados 11a y 11b. En esta realización, el plasma de arco remoto es atrapado por el campo magnético de bucle cerrado a lo largo de los lados largos de la descarga de magnetrón.

En incluso otro ajuste, la Figura 25B ilustra la campana catódica 18c, que penetra la porción corta 667c del área de descarga de magnetrón 667 en el lado del cátodo. Se abre a la cámara catódica 18 a través de la abertura 18d y tiene un compartimento de ánodo 18e al otro lado de la porción corta 667c del área de descarga de magnetrón 667. El ánodo intermedio 9c se instala dentro de un compartimento de ánodo 18e de la campana del cátodo 18c. La campana catódica 18c también tiene dos aberturas 18a y 18b que miran a lados opuestos del área de descarga de magnetrón 667a y 667b en su porción corta 667c en el lado de arco catódico. La descarga de arco remoto 562 que se muestra en la Figura 22a se propaga a lo largo de la campana catódica, a lo largo de las áreas de descarga de magnetrón 667a, 667b y 667c, donde el plasma de arco remoto está confinado por el campo magnético de bucle cerrado del magnetrón 669. La cámara catódica 1a y la protección de la cámara catódica 18 incluyen un ánodo de arco principal 5, un cátodo de arco principal 4, una bobina magnética de direccionamiento 15 y un punto de arco catódico 66. El arco principal en la cámara catódica 1a es alimentado por el suministro de energía de arco principal 10, mientras que el arco de remoto que conduce entre el cátodo principal 4 y el ánodo remoto (no se muestra) es alimentado por el suministro de energía de arco remoto 11. En particular, la descarga de arco remoto de arco se propaga desde la cámara catódica 18 por medio de la abertura 18d en la campana catódica 18c, hacia el ánodo intermedio 9c, que es alimentado por un suministro de energía separado, mientras que, al mismo tiempo, se propaga a través de las aberturas 18a y 18b al área de descarga de magnetrón confinada 667 dentro de su porción corta 667c en el lado catódico y continúa propagándose a lo largo de la porción de ambos lados de la descarga de magnetrón 667a y 667b hacia el ánodo remoto al otro lado de la diana magnetrónica. Las flechas muestran la dirección de la corriente de arco remoto hacia el ánodo remoto posicionado al otro lado de la diana magnetrónica (no se muestra). Esto confinará efectivamente los chorros de plasma remoto 562a y 562b dentro de las porciones largas confinadas magnéticamente de la descarga de magnetrón 667a y 667b, como se ilustra en la Figura 25B.

Según la presente realización, la Figura 25C muestra una sección transversal de largas porciones de un cátodo 540 con una descarga de magnetrón 564 y una muesca de erosión 542 con una descarga de arco remoto incrustada 562. Nota: el confinamiento magnético del plasma de arco remoto mediante el campo magnético magnetrónico de bucle cerrado 585 mostrado en la Figura 25C se puede combinar con el confinamiento magnético confinando bobinas de manera opuesta y también con la cuadrícula anódica, como se ilustra en las Figuras 22E y 24B. En un ajuste, la descarga de arco principal puede incrustarse dentro de una porción corta de la descarga de magnetrón. En este caso, la descarga de arco puede ser una descarga termoiónica de filamentos o una descarga catódica hueca con el cátodo totalmente inmerso dentro de la porción corta de la descarga de magnetrón.

En un ajuste, el confinamiento del plasma de arco remoto frente a la diana magnetrónica se puede lograr sin imanes permanentes, como se ilustra en la Figura 25D. En esta realización, la bobina electromagnética 539 se posiciona detrás de la diana magnetrónica 541. Las líneas del campo magnético de confinamiento con forma de arco 585 se crean frente a la diana magnetrónica como una porción de líneas de fuerza magnética de bucle cerrado creadas alrededor de los conductores de corriente lineales 539a y 539b. El área de erosión del circuito 542 se desarrolla bajo los arcos de campo magnético 585, mientras que el arco remoto 562 se crea entre la cámara catódica posicionada en un extremo de la larga diana magnetrónica con la abertura que mira a uno de los lados cortos del circuito y un ánodo remoto adyacente al lado corto del circuito en el extremo opuesto de la diana magnetrónica a lo largo de su lado largo; el arco remoto 562 se sumerge dentro del área de descarga de plasma del circuito, definida bajo las líneas de fuerza magnética arqueadas 585. La Figura 25E ilustra una variación con dos bobinas electromagnéticas 538 y 539 posicionadas detrás de la diana magnetrónica 54, que se extiende en sentido contrario a la parte trasera de la diana magnetrónica 541. En esta variación, los conductores de corriente lineales 538a y 539a tienen una dirección opuesta de la corriente, y están posicionados inmediatamente detrás de la diana magnetrónica 541 a fin de crear campos magnéticos de confinamiento de un plasma con forma de arco 585 frente a la diana magnetrónica 541. Esta configuración del campo magnético no está creando una configuración de bucle cerrado usada en la pulverización catódica con magnetrón convencional, sino que crea dos campos magnéticos de circuito distintos y paralelos, los cuales son las porciones del campo de bucle cerrado circular alrededor de los conductores de corriente 539a y 538a. Los conductores lineales de cierre 538b y 539b están posicionados lejos de la diana magnetrónica 541. En esta configuración, se pueden establecer dos descargas de arco remoto independientes 562a y 562b dentro de dos áreas de circuito bajo las líneas de fuerza magnéticas 585a y 585b, frente a la diana de pulverización catódica con magnetrón 541. Dos áreas de erosión paralelas y no conectadas 542a y 542b se desarrollarán inmediatamente debajo del plasma denso y magnéticamente confinado del circuito, generado por las descargas de arco remoto 562a y 562b. También es posible crear un mayor número de áreas de circuito no conectadas y paralelas 585 con arcos remotos independientes

paralelos magnéticamente confinados 562 y áreas de erosión no conectadas y paralelas asociadas 542 mediante el uso de un gran número de bobinas electromagnéticas 539 con conductores lineales frontales 538a, 539a y otros posicionados inmediatamente detrás de la diana magnetrónica 541, y con una dirección opuesta de las corrientes en los conductores lineales vecinos 539a y 538a, y conductores lineales adicionales paralelos entre sí que miran a la

5 diana magnetrónica 541. Los conductores de cierre de las bobinas electromagnéticas 538, 539 y los conductores adicionales paralelos entre sí se posicionan en sentido contrario de la diana magnetrónica 541. La densidad de flujo magnético generada por los conductores lineales 538a y 539a dentro del área del circuito inmediatamente frente a la diana magnetrónica 541 debe ser suficiente para confinar las columnas de plasma de arco remoto dentro del área de descarga en el circuito y puede oscilar de 5×10^{-3} a 2 Tesla. La más alta densidad de flujo magnético puede ser

10 necesaria para tales aplicaciones diversas de la presente invención, como los reactores para la fusión de plasma controlada, la propulsión de plasma y los láseres de iones de vapor de metal. Para lograr la densidad de campo magnético en el intervalo de 0,5 a 1,5 T, se pueden usar bobinas electromagnéticas con hilos superconductores enfriados criogénicamente. Cuando se usan bobinas electromagnéticas para hacer la configuración del campo magnético de arco en las áreas de pistas de enfriamiento, la pulverización catódica de la diana de pulverización

15 catódica 541 se puede lograr a un voltaje diana mucho menor, típicamente comenzando a partir de 100 V en un contraste agudo con la descarga de magnetrón convencional, que tiene un umbral de comienzo de alrededor de 300 V. En el caso del uso de bobinas electromagnéticas en lugar de imanes permanentes, la diana de la pulverización catódica se puede energizar mediante la aplicación tanto de energía de CC, de RF y/o de pulso de CC a la diana magnetrónica. El voltaje de CC típicamente puede oscilar de 100 V a 2 kV, mientras que voltaje de pulsos de CC

20 puede oscilar de 100 V a 10 kV, con una amplitud de corriente de pulso que oscila de 1 A a 100 kA. El modo de pulverización catódica de bajo voltaje también se puede emplear para la limpieza iónica de la diana de pulverización 541 en los procedimientos de pulverización catódica reactivos. Opcionalmente, la diana de pulverización 541 puede ser móvil en la dirección paralela al plano de la diana, como se muestra mediante la flecha de dos vías en las Figuras 25E. La utilización material de la diana de pulverización catódica 541 puede mejorarse sustancialmente mediante el

25 escaneo de la diana 541 hacia adelante y hacia atrás, manteniendo posiciones estables de los tramos de erosión 542, las cuales se definen mediante conductores lineales 538 y 539 posicionados detrás de la diana 541. En la referencia a la Figura 25F, se presenta la vista global de la fuente de pulverización catódica con magnetrón 540 de la presente invención, la cual usa 4 bobinas electromagnéticas 536, 537, 538 y 539 para crear cuatro áreas de erosión de circuito independientes en la pulverización catódica de la diana 541. Las bobinas electromagnéticas tienen conductores

30 lineales frontales 536a, 537a, 538a y 539a adyacentes a la diana 541, los cuales crean cuatro columnas paralelas del campo magnético con forma de arco en frente de la diana de pulverización catódica 541, que corresponden a cuatro pistas de enfriamiento independientes paralelas en frente de la diana de pulverización catódica 541. Las bobinas electromagnéticas 536 a 539 tienen direcciones alternas de las corrientes, como se muestra con las flechas en la Figura 25F. Las bobinas electromagnéticas también tienen conductores de cierre, 536b, 537b, 538b y 539b lejos de la

35 diana 541 y en paralelo a los conductores lineales frontales. Las cámaras catódicas 1a, 1b, 1c y 1d con las fuentes de arco catódico principales para generar cuatro arcos principales independientes se posicionan de manera adyacente al lado inferior de la diana 541, mientras que el ánodo de arco remoto, común a todos los cuatro arcos remotos, se posiciona en la cámara de ánodo remoto 8 adyacente al lado superior de la diana 541. Los arcos remotos 562a, 562b, 562c y 562d están inmersos dentro de las pistas de enfriamiento correspondientes en frente de la diana magnetrónica

40 541. Las direcciones de corriente de los arcos remotos están en la misma dirección desde el cátodo en una parte inferior de la figura y hacia el ánodo en una parte superior de la figura. Los arcos remotos están entrando al área de las pistas de enfriamiento correspondientes a través de las aberturas 18a, 18b, 18c y 18d en las cámaras catódicas 1a, 1b, 1c y 1d, respectivamente. Las columnas de plasma de arco remoto están confinadas a la diana 541 mediante el campo magnético con forma de arco, creado por los conductores lineales 536a, 537a, 538a y 539a. Esta realización

45 avanzada ilustra la oportunidad de tener un gran número de pistas de enfriamiento adyacente a una diana de pulverización catódica común, mientras se usan bobinas electromagnéticas como los medios de generación de pistas de enfriamiento. De manera alternativa, las matrices paralelas de los imanes permanentes, con polaridades alternas de las matrices vecinas, también pueden usarse para crear múltiples descargas de ser también usado para crear una descarga de magnetrón de circuito múltiple con columnas de plasma de arco remoto inmersas frente a la gran diana

50 de pulverización catódica con magnetrón rectangular 541. Con referencia a la Figura 25G, dos pistas de enfriamiento paralelas se desarrollan mediante dos conjuntos de matrices con forma de yugo de imanes permanentes 539 y 538. Cada una de estas matrices consiste en imanes permanentes 539a, 539b, 538a, 538b, adyacentes al lado trasero de la diana magnetrónica 541, que se puede hacer de aleaciones magnéticas tales como la aleación de Sm-Co. Las derivaciones magnéticas de cierre 539c y 538c se pueden hacer de una aleación magnética suave, tal como una

55 aleación de hierro puro. Los túneles magnéticos con descargas de arco remoto incrustadas 562, paralelas al lado largo de la diana 541, se crean bajo las líneas de fuerzas magnéticas con forma de arco 585 entre los polos norte y sur de los yugos magnéticos respectivos 538 y 539, que crean dos túneles magnéticos independientes sobre las pistas de enfriamiento 542a y 542b, que confinan dos arcos remotos independientes 562a y 562b que son principalmente responsables de generar el plasma en frente de la diana de pulverización catódica con magnetrón 541. Como se ilustra

60 mediante la flecha en la Figura 25G, la diana de pulverización catódica es móvil en una dirección paralela al plano de

la diana, lo que permite un aumento en la velocidad de utilización de la diana. El magnetron rotatorio con la matriz de imanes permanentes posicionada adyacente a la diana rotatoria también se puede usar, lo que puede aumentar sustancialmente la utilización de la materia la diana de pulverización catódica. Con referencia a la Figura 25H, la matriz de imanes permanentes con forma de yugo 539 es similar a una que se muestra en la Figura 25G, se alinea detrás de una diana de pulverización catódica rotatoria 541 con el lado largo de la matriz de imanes 539 en paralelo a los ejes de rotación de la diana, lo cual se muestra con las flechas en la Figura 25H. El chorro de plasma de arco remoto 562 se confina magnéticamente dentro del área de la diana posicionada entre los polos norte y sur de la matriz magnética 539 y la barrera magnética de confinamiento definida por las líneas del campo magnético con forma de arco 585. Otra variación de esta realización se muestra en la Figura 25I, en la que una lámina fina móvil de la diana de pulverización catódica 541 se hace con un acuerdo rodillo a rodillo entre dos rodillos 541a y 541b. En un ajuste, la diana de pulverización catódica se puede hacer en la forma de un disco con descargas de arco remoto paralelas, como se muestra de manera ilustrativa en la Figura 25J. En esta disposición, la diana de pulverización catódica con magnetron 541 tiene la forma de un disco y se posiciona dentro de la protección conectada a tierra 541a. Varias descargas de arco remoto paralelas 562a, 562b, 562c y 562d se crean entre las cámaras catódicas 1a, 1b, 1c y 1d en un lado de la protección 541a, y el ánodo remoto mutuo 8 en el lado opuesto de la protección 541a, y se confinan magnéticamente y se extienden a lo largo de la protección 541a por medio de las matrices magnéticas paralelas o las bobinas electromagnéticas posicionadas detrás de la diana 541. Los arcos remotos penetran dentro del área del circuito por medio de las aberturas 18a, 18b, 18c y 18d en las cámaras catódicas 1a, 1b, 1c y 1d. La diana 541 es energizado por el suministro de energía magnetronica 12. Cuando la diana 541 rota en la dirección mostrada por las flechas en la Figura 25J, la erosión del circuito es uniforme en la diana que resulta en el aumento de la velocidad de utilización de la diana. En una variación de la realización que se muestra en la Figura 25C, la bobina electromagnética adicional 581 puede añadirse alrededor del cátodo 540, como se ilustra en la Figura 25K. Las líneas del campo magnético 586 de la bobina 581 deben tener las mismas direcciones que las líneas del campo magnético 585 creadas por los imanes permanentes del cátodo magnetronico 540. En este caso, el campo magnético creado por los imanes permanentes se mezcla con el campo magnético creado por la bobina 581 que mejorará aún más la capacidad de trampa magnética del plasma de arco remoto asistida por magnetron 540 y la densidad del plasma en frente de la diana magnetronica 541. La configuración en línea de la RAAMS con realce electromagnético se muestra de manera esquemática en la Figura 25L. En esta figura, también se muestra un mapeo magnético producido mediante modelado por ordenador, usando un software basado en FEM. En este modelo, la corriente en los conductores lineales 581a, 581b, 582a, 582b, y otros de las bobinas electromagnéticas que rodean a los cátodos magnetronicos se configura en 10.000 A. Los imanes permanentes 539a, 539b y 539c del yugo magnético magnetronico 539 hechos de materiales magnéticos duros, tales como aleaciones de Sm-Co, son simulados por los vectores de magnetización, mientras que la derivación magnética 539d, típicamente hecha de hierro blando, se simula mediante la curva de BH no lineal. En el modelo mostrado en la Figura 25L, la magnetización de los imanes permanentes se configura en $M=5 \times 10^5$ A/m. Los polos de los magnetrones 540 posicionado en las filas opuestas del sistema en línea 10, así como también los polos del magnetron posicionados uno al lado del otro en una fila, son opuestos entre sí. El mecanismo de soporte del sustrato 534 capaz de mover los sustratos a recubrir en la dirección lateral se posiciona a lo largo de la línea paralela a las dianas magnetronicas 541 en el medio entre dos filas opuestas de los magnetrones 540. En un ajuste, la cámara en línea RAAMS con realce electromagnético con magnetrones rotatorios se muestra en la Figura 25M. Los magnetrones rotatorios 540 se posicionan en la cámara de vacío 10, formando dos filas opuestas que miran a los sustratos instalados en la plataforma de soporte de sustratos móvil lateralmente 534. Los magnetrones rotatorios consisten en una diana cilíndrica rotatoria 541 y el yugo magnético 539. Las bobinas electromagnéticas 581, 582, 583, y otras, se instalan fuera de la cámara de vacío dentro de los huecos entre los magnetrones vecinos 540. Las corrientes en los conductores lineales posicionados en los lados opuestos del cátodo magnetronico tienen direcciones opuestas. Por ejemplo, las corrientes en los conductores 581a, 582a, 583a y 584a son opuestas a las corrientes en los conductores 581b, 582b, 583b y 584b. Las polaridades de los cátodos magnetronicos que se miran entre sí en las filas opuestas, así como también la polaridad de los cátodos vecinos en la misma fila, también son opuestas entre sí. La descarga de arco remoto se puede extender en la dirección paralela a ya sea el lado corto de la diana magnetronica 541, como se muestra, por ejemplo, en la Figura 1A, o en la dirección paralela al lado largo de la diana magnetronica 541, como se muestra, por ejemplo, en la Figura 18B.

En una variación, la Figura 26A muestra una vista lateral y transversal del arco de vacío principal entre dos electrodos de varilla opuestos, posicionados en toda la porción corta de la descarga de magnetron. Dos electrodos de barra coaxiales, el cátodo principal 701 y el ánodo principal 702, se enfrentan entre sí y se sumergen dentro de la parte corta de la descarga de magnetron 564 con los ejes de los electrodos de varilla perpendiculares a la descarga de magnetron. Ambos electrodos tienen clavijas de enfriamiento en agua. Los electrodos de varilla pueden estar hechos de tungsteno, molibdeno, grafito u otro metal refractario o aleación. El arco principal, alimentado por el suministro de energía 10, puede ser encendido usando un dispositivo de bobina de resorte magnético que consiste en un solenoide 704 y un resorte 705. Opcionalmente también puede tener un encendedor separado que puede desencadenar la descarga de arco de vacío en la superficie del cátodo 701. El encendedor separado también se puede posicionar cerca del hueco

entre los electrodos y se lo puede alimentar con el suministro de energía de pulso de alto voltaje o el suministro de energía de RF. Se aprecia que ya sea el cátodo de varilla 701 o el ánodo de varilla 702, o ambos electrodos de varilla, pueden tener canales para suministrar gas, como argón, al hueco entre los electrodos para facilitar el encendido de la descarga de arco principal, como se muestra ilustrativamente en la Figura 26C. En referencia a la Figura 26C, la varilla del cátodo de arco principal 701 tiene un canal 736 para suministrar el gas que crea el plasma dentro del hueco entre los electrodos 738. El gas que crea el plasma, típicamente argón, es suministrado por medio de la línea de suministro de gas del cátodo 734. En este caso, el voltaje de pulso de RF puede suministrarse al cátodo 701 o el ánodo 702 usando un oscilador mediante el condensador de separación para encender la descarga de arco principal. La inductancia se puede usar en el circuito de energía de CC de arco principal para proteger el suministro de energía de CC de los pulsos de RF de alto voltaje. Los impulsos de encendido o voltaje de RF, así como también el flujo de gas en el cátodo principal puede discontinuarse inmediatamente después del encendido del arco principal, el cual continuará operando en el modo de arco de vacío. Opcionalmente, la campana catódica 18a cubre los electrodos de varilla de arco principal, impidiendo que la erosión catódica contamine el flujo del metal de pulverización catódica con magnetrón, como se ilustra en la Figura 26D. La campana catódica 18a puede rodear parcialmente o cubrir de manera total una porción corta de la descarga de magnetrón formando un tubo de descarga para confinar una porción de la descarga de arco remoto dentro de una rama corta del circuito magnetrónico paralelo al lado corto de la diana magnetrónica 634. El ánodo remoto 9 en una forma de una campana rodea parcialmente o cubre totalmente una porción corta de la descarga de magnetrón en el lado opuesto de la diana magnetrónica larga 541, se conecta al polo positivo del suministro de energía de arco remoto 11, mientras su polo negativo se conecta al cátodo principal 701. De manera alternativa, la descarga de arco remoto puede establecerse entre el ánodo principal 702 y el ánodo remoto 9. En este caso, el ánodo principal 702 sirve como un cátodo intermedio a la descarga de arco remoto 562. El suministro de energía de arco principal 10 puede ser un suministro de energía de corriente alternativa para establecer el arco principal de CA entre los electrodos de varilla de arco principal 701 y 702. En este caso, cualquiera de los electrodos 701 o 702 puede servir como un cátodo para la descarga de arco remoto 562. Después del encendido de la descarga de arco principal entre el cátodo principal 701 y el ánodo principal 702, la descarga de arco remoto 562 se enciende inmediatamente entre el cátodo principal 701 y la campana del ánodo remoto 9. Dos ramas de la descarga de arco remoto se crean a lo largo de las porciones largas de la descarga de magnetrón 564, conectando el cátodo 701 con el ánodo remoto 9. La dirección del arco de ánodo remoto se muestra en la Figura 26A mediante las flechas. El plasma de arco remoto 562 se confina magnéticamente dentro de la descarga de magnetrón mediante el campo magnético magnetrónico 585 que aísla magnéticamente el plasma e impide sus pérdidas por difusión. La posición de los electrodos de arco principal dentro de la porción corta de la descarga de magnetrón paralela a la porción corta de la diana magnetrónica 541 se muestra con más detalles en la Figura 26B. Ambos electrodos tienen clavijas de enfriamiento con agua, lo que se muestra esquemáticamente en 706 y 703. La clavija de enfriamiento con agua 703 se muestra en el lado trasero de la varilla del ánodo. El hueco del cátodo-ánodo de arco principal se posiciona en la porción de la descarga de magnetrón 564 donde las líneas del campo magnético del campo magnético magnetrónico 585 son generalmente paralelas a los ejes del par de electrodos coaxiales de cátodo-ánodo.

Según la presente realización, mostrada en la Figura 26B, el cátodo 701 es típicamente troncocónico, mientras que el ánodo 702 puede tener una superficie plana perpendicular a los ejes del ánodo. En este caso de las formas de cátodo troncocónicas, el arco catódico preferentemente se ubicará en el extremo de la varilla del cátodo, mirando al ánodo. El hueco entre los electrodos típicamente oscila de 1 a 50 mm, generalmente sin superar el ancho del circuito, mientras que el diámetro de los electrodos de varilla oscila de 5 a 30 mm. La distancia desde los ejes de cátodo-ánodo a la diana magnetrónica 541 generalmente oscila de 5 a 40 mm, pero preferentemente oscila de 10 a 25 mm.

Incluso con referencia a la presente realización, la Figura 26D muestra el cátodo 540 con un arco catódico de vacío principal, incluyendo el cátodo de varilla principal 701 y el ánodo de varilla principal 702 posicionados en el medio de una de las porciones cortas del circuito magnetrónicos 667. Las varillas del cátodo-ánodo se configuran coaxialmente en todo el circuito magnetrónico 667. El hueco de descarga de arco principal 4 entre el cátodo principal 701 y el ánodo principal 702 se posiciona en el área donde las líneas de fuerza magnética del campo magnético magnetrónico son generalmente paralelas al eje del cátodo-ánodo. La bobina de resorte 704 se usa para mover el cátodo a fin de encender la descarga de arco principal dentro del hueco del cátodo-ánodo 738. El arco principal es alimentado por el suministro de energía 10. El ánodo remoto 9 en una forma de una campana rodea la porción corta del circuito magnetrónico en el lado opuesto de la diana magnetrónica. El ánodo remoto es alimentado por el suministro de energía 11 conectado entre el cátodo principal 701 y el ánodo remoto 9. La descarga de arcos remotos 562 se incrusta dentro de la descarga de magnetrón 667 y la corriente de arco remoto se conduce a través de dos ramas paralelas 562a y 562b de la descarga remota de arco incrustada con las ramas paralelas del lado largo correspondientes de la descarga de magnetrón 667a y 667b. El plasma de la descarga de magnetrón 667 con la descarga de arco remoto incrustada 562 se limita por el campo magnético magnetrónico de bucle cerrado 585. Las flechas muestran la dirección de la corriente de arco remoto hacia el ánodo remoto posicionado al otro lado de la diana magnetrónica. La densidad de corriente de arco remoto puede estimarse como se indica a continuación:

$$j_{\text{RAAD}} = I_{\text{RAAD}} / A_{\text{M.D.}} = I_{\text{RAAD}} / (W_{\text{M.D.}} * H_{\text{M.D.}})$$

5 donde I_{RAAD} y j_{RAAD} son la corriente de descarga de arco de ánodo remoto y la densidad de la corriente de descarga de arco de ánodo remoto respectivamente; $W_{\text{M.D.}}$, $H_{\text{M.D.}}$ es el ancho de descarga de magnetrón, que es típicamente igual al ancho del circuito en la diana magnetrónica y es el espesor o la altura de la descarga de magnetrón, que es típicamente igual o inferior al ancho del circuito. El área de la zona de confinamiento magnetrónico $A_{\text{M.D.}} = W_{\text{M.D.}} * H_{\text{M.D.}}$. La densidad de corriente RAAD a ser confinada dentro de la descarga de magnetrón que es necesaria para asegurar una alta ionización del flujo de pulverización catódica con magnetrón típicamente oscila de 1 a 500 A/cm². Por ejemplo, si $H_{\text{M.D.}} = 5$ cm, $W_{\text{M.D.}} = 5$ cm, $A_{\text{M.D.}} = 25$ cm y la corriente RAAD de la descarga RAAD incrustada dentro de una de dos ramas del lado largo de la descarga de magnetrón $I_{\text{RAAD}} = 250$ A, a continuación, $j_{\text{RAAD}} = 10$ A/cm². Las bobinas de confinamiento y la jaula del ánodo que rodea la descarga magnetrón también se pueden usar además del confinamiento magnético mediante el campo magnético en sí mismo, como se analizó antes y se ilustró en las Figuras 22E y 24B.

15 En un ajuste, la descarga de arco principal se puede generar mediante el propulsor de chorro de arco posicionado adyacente a la porción corta del circuito de la descarga de magnetrón, como se ilustra en la Figura 26E, que es una variación avanzada de la realización que se muestra en la Figura 26C. El cátodo 540 tiene un propulsor de chorro de arco 722 como una fuente de arco principal que consiste en el cátodo de varilla 701 y el ánodo-boquilla 703 que genera un penacho de plasma de arco 705 que cruza la porción corta del circuito magnetrónico 667c, mientras que el ánodo remoto 8 tiene una campana 9 que rodea la porción corta de la descarga de magnetrón 667d en el lado opuesto de la diana magnetrónica. El arco principal dentro del propulsor de chorro de arco 722 es alimentado mediante el suministro de energía principal 10. Opcionalmente, la campana catódica 18a cubre el propulsor de chorro de arco 722, impidiendo que la erosión catódica contamine el flujo del metal de pulverización catódica con magnetrón. La campana catódica 25 18a se puede extender para rodear toda la porción corta del circuito magnetrónico 667c en el lado del propulsor de chorro fuente de arco principal 722 formando un penacho de plasma de arco 705 en la forma de un tubo de descarga para guiar el chorro del arco remoto a lo largo del circuito magnetrónico dentro del plasma de descarga de magnetrón 667. La descarga de arco remoto 562 se propaga a lo largo de las largas porciones del plasma de descarga del circuito magnetrónico 667a y 667b hacia el ánodo remoto 9. Las direcciones de la corriente de descarga de arco remoto se muestran mediante las flechas en la Figura 26E. Una de las razones por las que el plasma de descarga de arco remoto puede incrustarse dentro de la descarga de magnetrón es que la resistividad eléctrica en las líneas de fuerza magnética es mucho más alta a lo largo del eje de la descarga de magnetrón, lo que hace posible confinar magnéticamente el plasma de magnetrón junto con el plasma de arco remoto incrustado cerca de la superficie de la diana magnetrónica, impidiendo que la corriente de arco remoto escape hacia el exterior del área del circuito magnetrónico. En el procedimiento RAAMS, el campo magnético magnetrónico hace que el plasma magnetrónico y el plasma de arco remoto queden confinados a lo largo del circuito de descarga de magnetrón. Como resultado, la densidad del plasma dentro del área de descarga en el circuito aumenta, lo que resulta en un aumento de la velocidad de pulverización catódica con magnetrón y la velocidad de ionización de los átomos de metal, lo cual contribuye a una mejora en la productividad del procedimiento de deposición y en las propiedades de los recubrimientos depositados.

40 en la Figura 26F, se presenta otra variación de la invención. La descarga de arco se puede iniciar dentro de la descarga de magnetrón entre dos electrodos posicionados de manera adyacente a la porción corta del circuito de descarga de magnetrón, en lados opuestos de la diana magnetrónica. Los dos electrodos de varilla 822 y 821 se sumergen en la descarga de magnetrón dentro de las porciones cortas del circuito magnetrónico en los lados opuestos de la diana magnetrónica. Los electrodos de varilla son cubiertos por las campanas 18a y 9 posicionadas en la parte inferior del soporte de electrodos 18 y el soporte de electrodos superior 8 respectivamente. Los electrodos se conectan al suministro de energía de pulso de CC 800 que consiste en un transformador de alto voltaje 801, un rectificador 803, el condensador de almacenamiento de energía 805 y el interruptor 807. Los pulsos de alto voltaje unipolares se generan entre los electrodos 821 y 822 cuando se cierra el disparador 807. Los pulsos de alto voltaje con la amplitud de voltaje que oscila típicamente de 300 V a 50 kV y la corriente que oscila típicamente de 1 A a 10 kA, aplicados entre los electrodos 821 y 822 encienden la descarga de arco incrustada dentro del circuito de descarga que aumenta dramáticamente la densidad del plasma de descarga de magnetrón y la temperatura de los electrones, lo que lleva a un aumento en la ionización del flujo de átomos de metal de pulverización catódica magnetrónica. Simultáneamente, la energía de CC, de RF o de pulsos de CC, se puede aplicar a la diana de pulverización catódica con magnetrón. El voltaje de CC típicamente puede oscilar de 300 V a 2 kV, mientras que voltaje de pulsos de CC puede oscilar de 300 V a 10 kV, con una amplitud de corriente de pulso que oscila de 1 A a 100 kA.

En otro ajuste, la Figura 26G ilustra que el suministro de energía 800 puede ser el suministro de energía de RF o el suministro de energía de pulsos de RF, que consiste en el generador de RF 802 conectado a los electrodos 821 y 822

por medio del cable coaxial 810, que consiste en el conductor de alto voltaje interno 810b y la carcasa conectada a tierra 810a. Los electrodos de varilla enfriados con agua 821 y 822, sostenidos por los flancos dieléctricos 823 y 824, se sumergen en las porciones cortas 667c y 667d del circuito de magnetrón respectivamente. El conductor de alto voltaje 810b se acopla al generador de RF a través de la bobina de emparejamiento 804 y el condensador C. Cuando se aplica un pulso de RF de alto voltaje entre los electrodos 821 y 822, la descarga de alta corriente se genera a lo largo de las largas porciones 667a y 667b del circuito de magnetrón. La descarga de pulsos consiste en las columnas de arco de pulso 562a y 562b incrustadas dentro de la descarga de magnetrón. En este caso, el circuito de descarga de magnetrón sirve como una guía de onda para conducir ondas electromagnéticas que se generan con el suministro de energía de RF. La descarga de arco con inmersión en plasma aumenta la densidad de electrones y la temperatura de electrones del plasma de magnetrón que resulta en un aumento sustancial de la ionización del flujo de átomos de pulverización catódica con magnetrón. Se debe apreciar que la alta ionización, la alta densidad y la alta temperatura, que pueden obtenerse en el plasma RAAMS, también se pueden usar para otras aplicaciones aparte de la deposición de recubrimientos y el tratamiento de superficies. Por ejemplo, el flujo de vapor de metal altamente ionizado, generado por la descarga RAAMS se puede usar para la propulsión del plasma en los propulsores de plasma en el espacio. La descarga RAAMS inversa con potencial conectado a tierra, positivo o flotante, aplicado a la diana magnetronica y los pulsos de alto voltaje, ya sea de CC y RF, aplicado entre los electrodos de inmersión 821 y 822, se puede usar para la fusión de plasma controlada en el plasma de deuterio y tritio mixto confinado dentro de la trampa magnética del circuito magnetronico. La descarga RAAMS inversa también se puede usar para la fusión controlada inercial-electrostática (IECF), cuando la fuente de plasma RAAMS inversa puede crear un haz de iones denso a presiones inferiores a las de la descarga luminiscente convencional. En este caso, los pulsos positivos de alto voltaje se aplican a la diana magnetronica, mientras que el plasma denso de fondo se genera mediante la descarga de arco remoto. Opcionalmente, los pulsos positivos también se pueden aplicar a los electrodos de cadena positiva, posicionados en frente en la fuente de magnetrón, como se muestra, por ejemplo, en las Figuras 22E y 24B. En esta configuración, similar a la que se muestra en la Figura 24B, los haces de iones, generados por las fuentes de plasma RAAMS inversas opuestas, pueden colisionar, iniciando las reacciones de fusión de plasma dentro del área de colisión de haces de iones.

La Figura 27A muestra los espectros de iones de cromo generados en la descarga RAAMS recolectados por espectrometría de emisión óptica (OES) contra la corriente de arco de ánodo remoto con y sin un conjunto de imanes opuestos que tienen la misma configuración que el sistema magnético magnetronico, que imita la configuración que se muestra en la Figuras 22B y 22C, pero sin la corriente en las bobinas de confinamiento. Se puede observar que el aumento del campo magnético en el área de confinamiento de la descarga RAAD resulta en un aumento sustancial de la velocidad de ionización de los átomos de pulverización catódica de cromo. Los imanes opuestos con polaridad magnética emparejada (reflejada) crean un haz magnético a lo largo del plano de simetría con el magnetrón opuesto como se demostró en la Figura 24E, mediante los cálculos de elementos finitos. El plasma de pulverización catódica con magnetrón se concentra mediante el campo magnético a lo largo de las líneas de fuerza magnética del haz magnético, lo que contribuye al aumento de la eficiencia de ionización del procedimiento RAAMS. Con referencia a la Figura 27B, la misma demuestra el aumento de las concentraciones de átomos de argón excitados y la concentración de nitrógeno atómico en el plasma RAAMS en la mezcla gaseosa de argón-nitrógeno con el aumento de la corriente de arco remoto. Esto también se puede atribuir a un aumento sustancial de la densidad de electrones y la temperatura en el plasma RAAMS, cuando aumenta la corriente de arco remoto.

La Figura 28A es una ilustración esquemática del sensor de ionización de vapor de metal usado para la medición de la velocidad de la ionización de cromo en la descarga RAAMS que se presenta en la Figura 28B. Un sensor de microbalance de cristal de cuarzo cuadrículado (QCM) 830 con un sensor dual de carga frontal INFICON, acoplado con un microbalance de cristal de cuarzo se usa para la medición directa de la velocidad de ionización de metal. La salida de QCM entra en un transductor 840 y el ordenador 842. El diagrama de cableado 832 muestra la cuadrícula conectada a tierra 834, la primera cuadrícula 836 y la segunda cuadrícula 838. La primera cuadrícula 836 tiene un potencial de 12 V con respecto al potencial de tierra y la segunda cuadrícula 838 tiene un potencial variable de -12 a 88 V. La medición de la velocidad de ionización en el flujo de pulverización catódica de metal se puede definir como se indica a continuación:

$$\gamma_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m} + \dot{m}_i},$$

donde \dot{m} y \dot{m}_i son flujos de masa de vapor neutro y iones metálicos respectivamente. Para la medición de la velocidad γ_i , ambos sensores tienen un cabezal de analizador de energía cuadrículada idéntico (GEA), pero el GEA se activará solo en uno de estos sensores, mientras que el GEA del segundo sensor permanecerá pasivo. El sensor #1 con el GEA activo mide el flujo de vapor de metal neutro $\dot{g}_1 = \dot{m}$ repeliendo el componente de vapor ionizado, mientras que el

sensor #2 con el GEA pasivo mide el flujo de vapor de metal total $g_2 = m' + m''$. En este caso, la influencia de la GEA sobre la velocidad de deposición en la superficie del cristal sensor es la misma tanto para el sensor #1 como para el sensor #2. La velocidad de ionización se define, a continuación, mediante la relación de la lectura del sensor #1 g_1 respecto de la lectura del sensor #2 g_2 :

5

$$\gamma_i = (g_2 - g_1) / g_2$$

La Figura 28B la velocidad de ionización de los átomos de pulverización catódica de cromo medidos mediante una sonda GQCM en la descarga RAAMS con y sin los imanes opuestos, que imita la configuración mostrada en la Figura 22B y 22C sin corriente en las bobinas. Se puede observar que la ionización de los átomos de pulverización catódica de cromo aumenta con el incremento de la corriente del ánodo remoto. El aumento del confinamiento del campo magnético debido a los imanes opuestos resulta en aumento sustancial de la ionización de cromo en la descarga RAAMS, según los resultados obtenidos mediante OES.

Los niveles de la ionización de cromo del flujo de pulverización catódica que se muestran en las Figuras 27A y 28B son la cantidad promedio de ionización de cromo en el flujo de pulverización catódica en un diámetro de alrededor de 20 a 50 mm. Los sensores GQCM, así como también el monitor de plasma OES miden los valores de ionización del flujo de pulverización catódica de metal con un tiempo de integración relativamente alto, del orden de una medición por segundo. El grado de ionización instantánea en la zona donde el chorro del arco cruza el circuito magnetrónico es de hasta el 100 %.

En otra realización, se proporciona un artículo recubierto formado mediante los procedimientos y sistemas expuestos anteriormente. Con referencia a la Figura 29A, el artículo recubierto 926 comprende los sustratos 928 que tienen una superficie 930 y el recubrimiento 932 dispuesto sobre la superficie 930. En un ajuste, el recubrimiento es un recubrimiento protector. Típicamente, el recubrimiento tiene una microestructura densa y un color característico. En un ajuste, el recubrimiento incluye un metal refractario que se hace reaccionar con nitrógeno, oxígeno y/o carbono para formar un nitruro, óxido o carburo de metal refractario. Los ejemplos de metales refractarios adecuados incluyen, entre otros, cromo, hafnio, tántalo, circonio, titanio y la aleación de circonio y titanio. El nitruro de cromo es un ejemplo de un recubrimiento particularmente útil hecho mediante los procedimientos expuestos anteriormente. En un ajuste, el recubrimiento tiene un espesor de alrededor 1 a alrededor de 6 micrones. Con referencia a la Figura 29B, se proporciona una variación de un recubrimiento de nitruro de cromo, que es una estructura de capas múltiples formada mediante los procedimientos expuestos anteriormente. El artículo recubierto 934 incluye una capa fina 936 de una capa de cromo que no ha reaccionado dispuesta sobre el sustrato 928 y una capa estequiométrica espesa de nitruro de cromo 938 dispuesta sobre la capa de cromo que no ha reaccionado 936. En un ajuste adicional, la estructura de capas múltiples incluye además la capa 940 de la capa de nitruro de cromo subestequiométrica intermedia dispuesta sobre la capa de nitruro de cromo estequiométrica 938. El nitruro de cromo estequiométrico intermedio 940 tiene una estequiometría dada por $\text{CrN}(1-x)$ donde x es un número entre 0,3 y 1,0. En un ajuste, el espesor de la capa de cromo sin reaccionar 936 está entre 0,05 y 0,5 micrones, el espesor de la capa de nitruro de cromo espesa 938 es de 1 a 3 micrones y el nitruro de cromo estequiométrico intermedio 940 es de 0,5 a 1 micrones.

40

Si bien se han ilustrado y descrito realizaciones de la invención, no se pretende que estas realizaciones ilustren y describan todas las formas posibles de la invención. En lugar de eso, las palabras usadas en la memoria descriptiva, son palabras de descripción, más que de limitación, y debe entenderse que es posible hacer varios cambios sin apartarse del alcance de la invención. La invención se define por las reivindicaciones.

45

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de tratamiento con plasma y recubrimiento de vacío que comprende:
 - 5 un conjunto de plasma (16) dispuesto de modo tal que mira a un sustrato (22), incluyendo el conjunto de plasma: una diana magnetrónica (Ts) que tiene una superficie diana; un cátodo magnetrónico con un borde largo, un borde corto y un polo magnético, estando dicho polo magnético dispuesto para formar, en el uso, un circuito de pulverización catódica dentro de la diana magnetrónica (Ts) y una barrera electromagnética;
 - 10 un ánodo (As) conectado eléctricamente al cátodo magnetrónico; un suministro de energía de cátodo magnetrónico (Ps) conectado al cátodo magnetrónico y al ánodo; al menos dos electrodos de descarga de arco remoto (44; 28); un suministro de energía de descarga de arco remoto conectado entre los al menos dos electrodos de descarga de arco remoto (44; 28), y dispuesto para generar al menos una descarga de arco remoto separada del cátodo magnetrónico y adyacente a la diana magnetrónica, de modo tal que, en el uso, la descarga de arco remoto se extienda a lo largo de una dirección paralela al borde largo del cátodo magnetrónico, y de modo tal que, en el uso, la descarga de arco remoto quede confinada dentro de un volumen de arco remoto adyacente a la diana magnetrónica, estando el volumen de arco remoto definido por la superficie de la diana en un lado y la barrera electromagnética en todos los otros lados;
 - 15 una campana de cátodo y una de ánodo, de la descarga de arco remoto (18b), que se extiende sobre la descarga de arco remoto y por el borde corto del cátodo magnetrónico; y una campana de ánodo de descarga de arco remoto (8b); comprendiendo el sistema de tratamiento con plasma y recubrimiento de vacío, además: un sistema magnético dispuesto para crear líneas de campo magnético que, en el uso, se extienden dentro de y se confinan en un plasma en frente del conjunto del plasma y el sustrato.
 - 20
 - 25
2. El sistema de la reivindicación 1, que comprende un suministro de energía de CC que tiene un voltaje de salida que oscila de 100 a 2000 V, y dispuesto para alimentar el cátodo magnético.
- 30 3. El sistema de la reivindicación 1 comprende un suministro de energía de RF dispuesto para alimentar el cátodo magnetrónico.
4. El sistema de la reivindicación 1 comprende un suministro de energía de pulso de CC dispuesto para alimentar el cátodo magnetrónico.
- 35 5. El sistema de la reivindicación 4, donde el suministro de energía de pulso de CC tiene un voltaje de salida que oscila de 300 V a 10 kV.
6. El sistema de la reivindicación 4, donde una densidad de energía para la diana magnetrónica (Ts) oscila de 50 W/cm² a 50 kW/cm².
- 40 7. El sistema de la reivindicación 1 que comprende dos descargas de arco remoto con un diferencial de voltaje de 50 a 3000 V; o donde la diana magnetrónica (Ts) se dispone, en el uso, para entrar en y salir del plasma; o donde el polo magnético es un electroimán situado detrás de la diana magnetrónica y se dispone para generar un campo magnético en frente de la diana magnetrónica; o donde el polo magnético es un imán permanente situado detrás de la diana magnetrónica y dispuesto para generar un campo magnético en frente de la diana magnetrónica; o donde la descarga de arco tiene una densidad de corriente de 1 a 300 A/cm².
- 45 8. El sistema de la reivindicación 1 que comprende además un electrodo de hilo con una forma en una dirección convexa con un vértice, en el uso, hacia el sustrato.
- 50 9. Un sistema modular en línea (10) que comprende un conjunto de sistemas de tratamiento con plasma y recubrimiento de vacío según las reivindicaciones 1 a 8, siendo dichos sistemas unidos de manera adyacente entre sí, y siendo dispuestos con bobinas magnéticas alternas, de modo tal que, en el uso, se crean las líneas del campo magnético.
- 55 10. El sistema de la reivindicación 1, donde, en el uso, la descarga de arco remoto entra en el plasma de un lado de la campana catódica (18b); o donde, en el uso, la descarga de arco remoto es generada por una propulsión desde un chorro de arco; o donde el suministro de energía de la descarga de arco remoto es un suministro de energía de CC.
- 60

11. El sistema de la reivindicación 1, donde el suministro de energía de descarga de arco remoto es un suministro de energía de CC pulsada.
- 5 12. El sistema de la reivindicación 11, donde el suministro de energía pulsada de CC tiene una corriente pulsada de 10 A a 100 kA.
13. El sistema de la reivindicación 1, donde el suministro de energía de descarga de arco remoto es un suministro de energía de RF.
- 10 14. El sistema de la reivindicación 1 u 8, que comprende electrodos de varilla opuestos (701; 702) que se disponen para generar la descarga de arco remoto, teniendo dichos electrodos de varilla un eje de varilla (738) que se extiende desde un electrodo de varilla hacia un electrodo de varilla opuesto, y teniendo un lado de dichos electrodos de varilla opuestos una entrada de gas central (736).
- 15 15. El sistema de la reivindicación 14, donde una distancia entre el eje de varilla (738) y la superficie diana es de 5 a 40 mm, preferentemente de 10 a 25 mm.
16. El sistema de la reivindicación 14, donde una distancia entre los electrodos de varilla opuestos (701; 20 702) es de 2 y 30 mm.
17. El sistema de la reivindicación 14, donde un diámetro de los electrodos de varilla (701; 702) es de 5 a 30 mm.
- 25 18. Un procedimiento para recubrir un sustrato (22) que comprende:
- alimentar un cátodo magnetrónico eléctricamente conectado a un ánodo (As), teniendo el cátodo magnetrónico un borde largo, un borde corto y un polo magnético configurado para formar un circuito de pulverización catódica dentro de una diana magnetrónica (Ts) que tiene una superficie, con el polo magnético dispuesto para formar una barrera
- 30 electromagnética;
- generar una descarga de arco remoto separada del cátodo magnetrónico y adyacente a la diana magnetrónica, la descarga de arco remoto se extiende a lo largo de una dirección paralela al borde largo del cátodo magnetrónico donde se encuentra confinada la descarga de arco remoto dentro de un volumen de arco remoto adyacente a la diana magnetrónica, estando el volumen de arco remoto definido por la superficie de la diana en un lado y la barrera
- 35 electromagnética en todos los otros lados, y una campana del cátodo de descarga de arco remoto (18b) se dispone de modo tal que se extiende por encima de la descarga de arco remoto y el borde corto del cátodo magnetrónico;
- alimentar una bobina magnética (578) para crear líneas de campo magnético que se extienden dentro de y confinan un plasma (562) en frente de la diana magnetrónica y el sustrato;
- hacer fluir gas dentro de una cámara de vacío (12);
- 40 bombear gas desde la cámara de vacío; y
- depositar un recubrimiento sobre el sustrato.

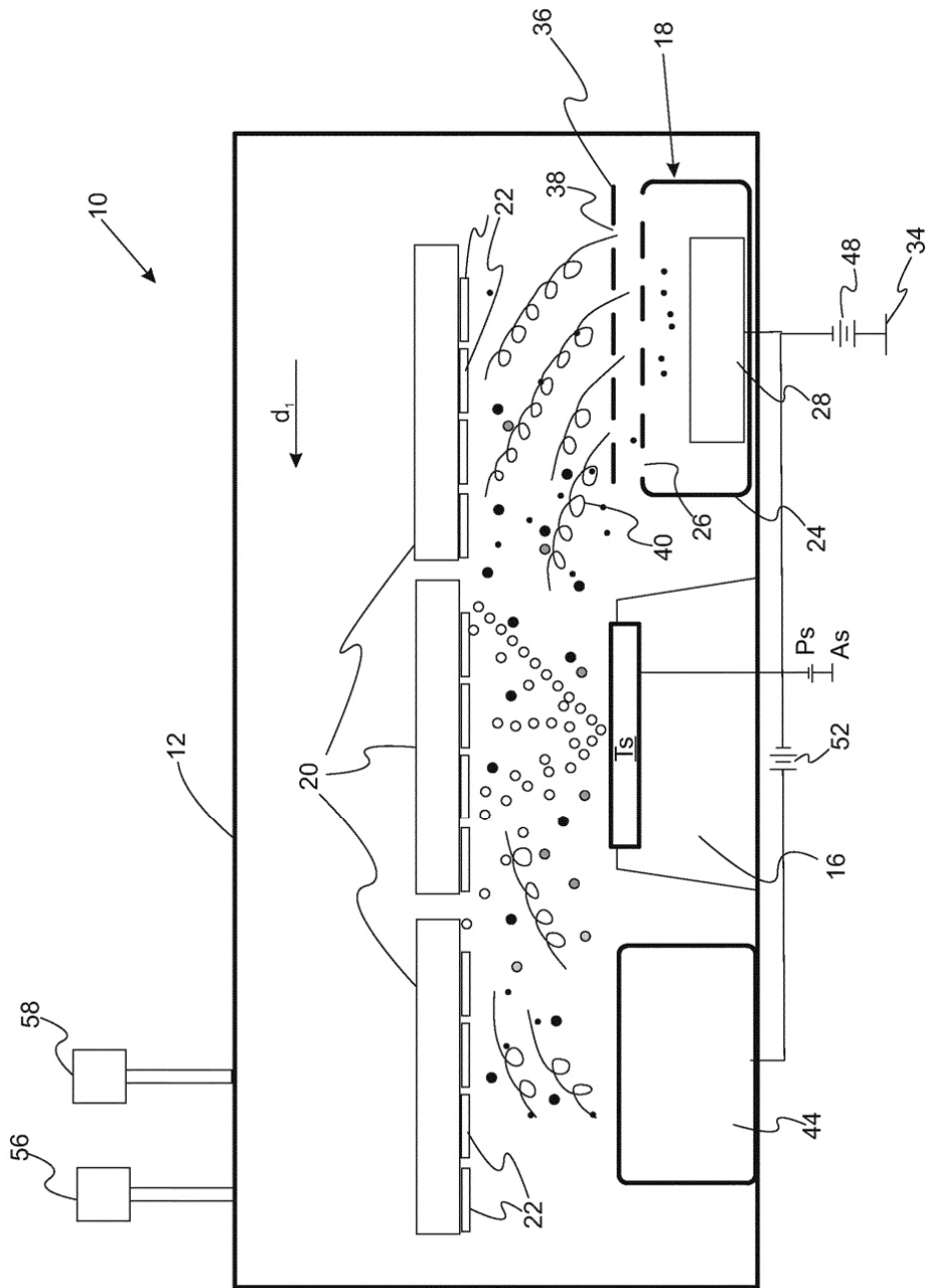


Fig. 1A

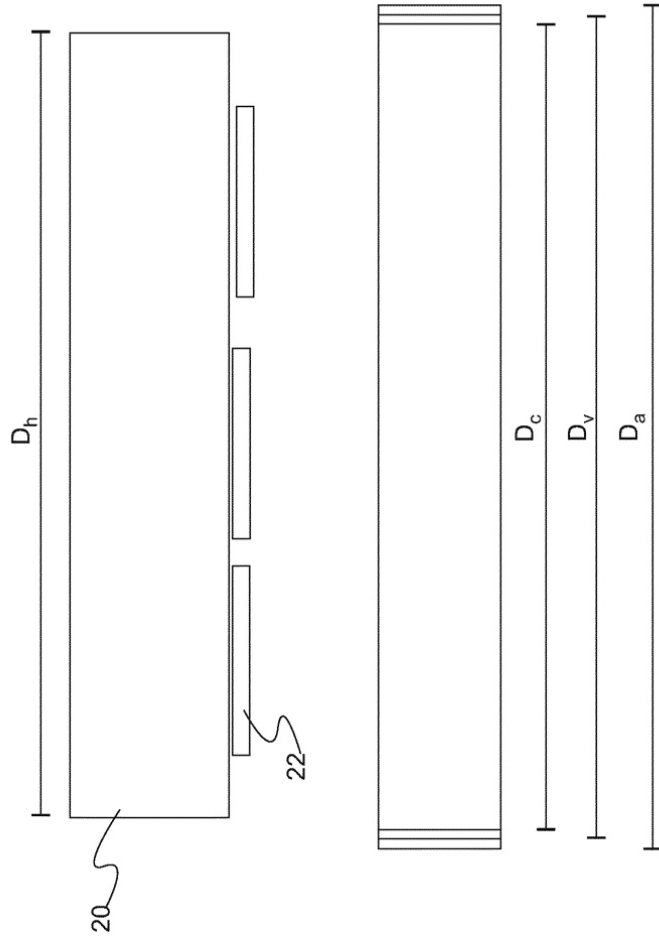


Fig. 1B

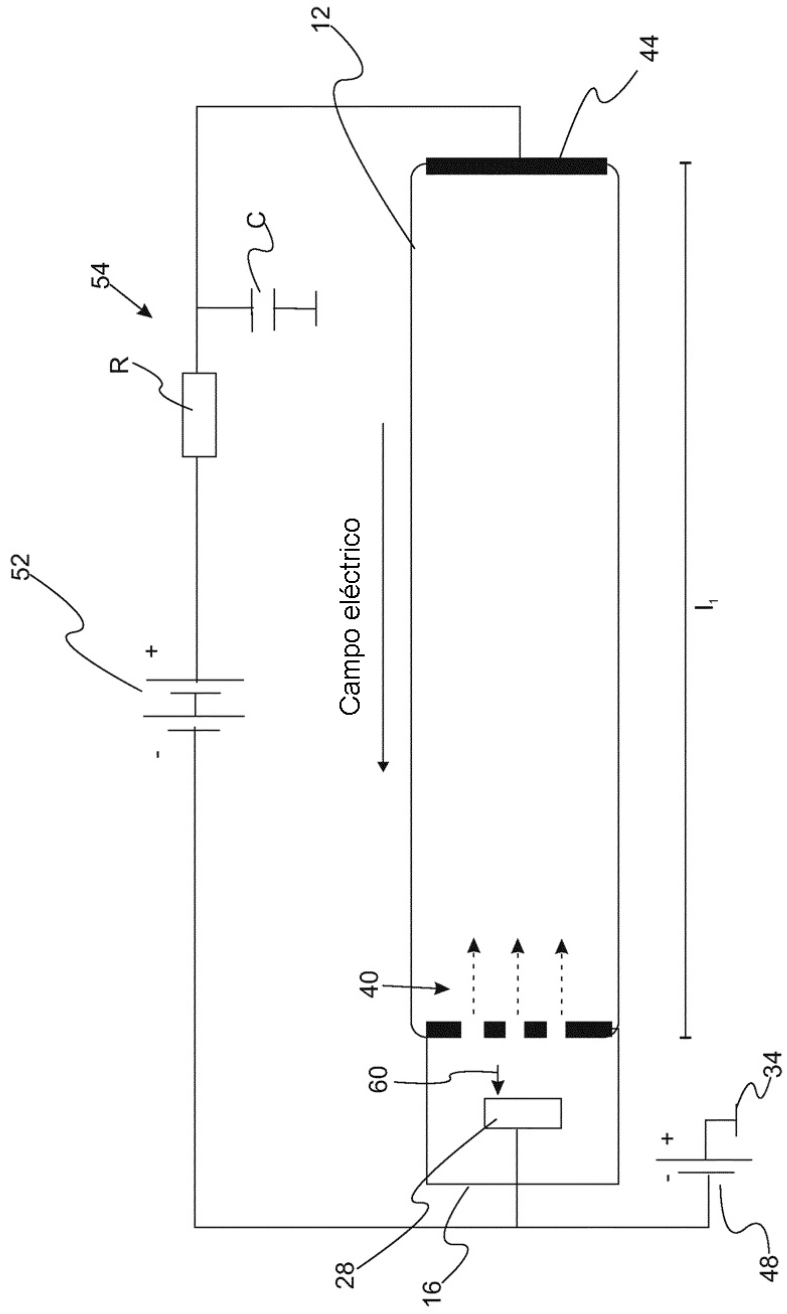


Fig. 1C

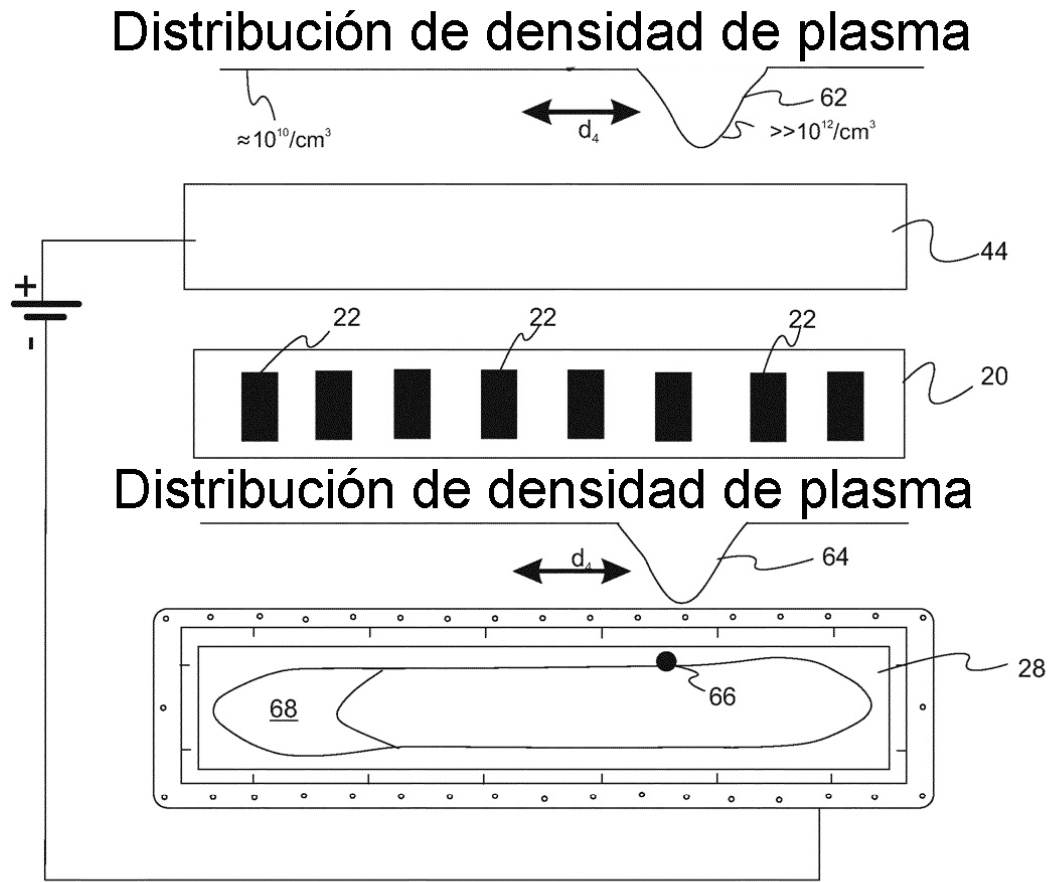


Fig. 1D

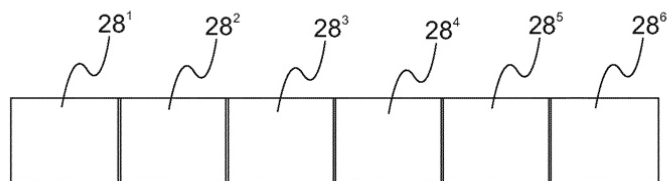


Fig. 1E

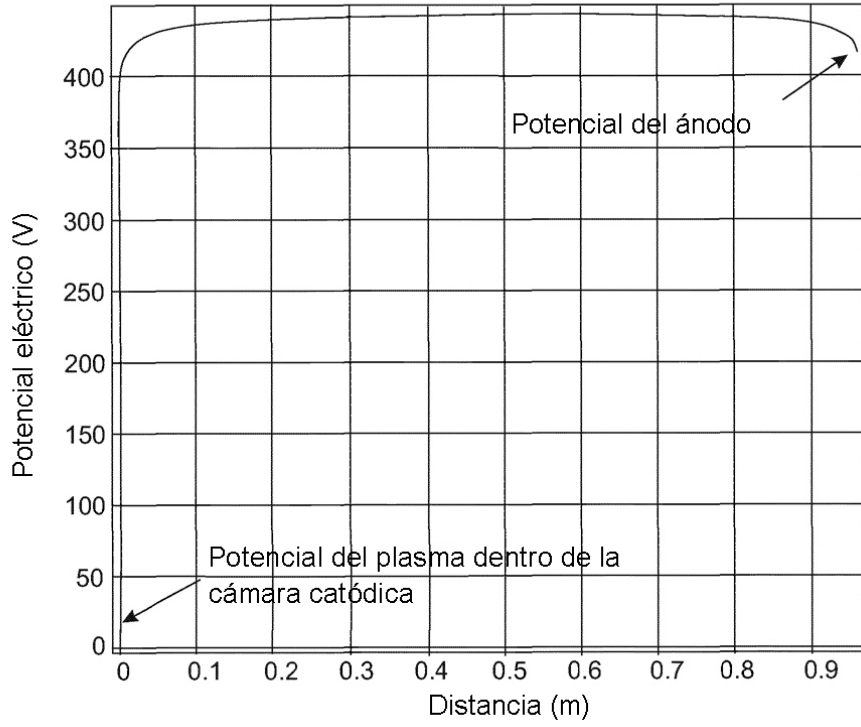


Fig. 2

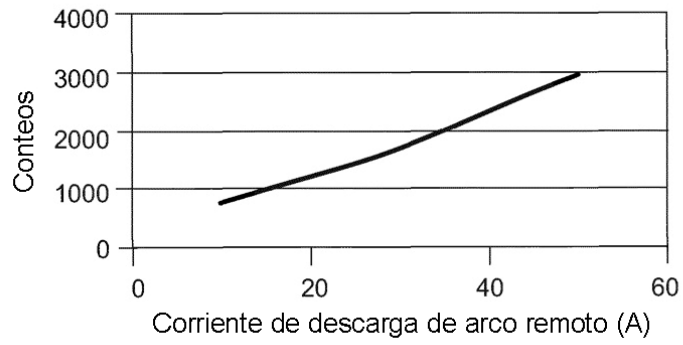


Fig. 3

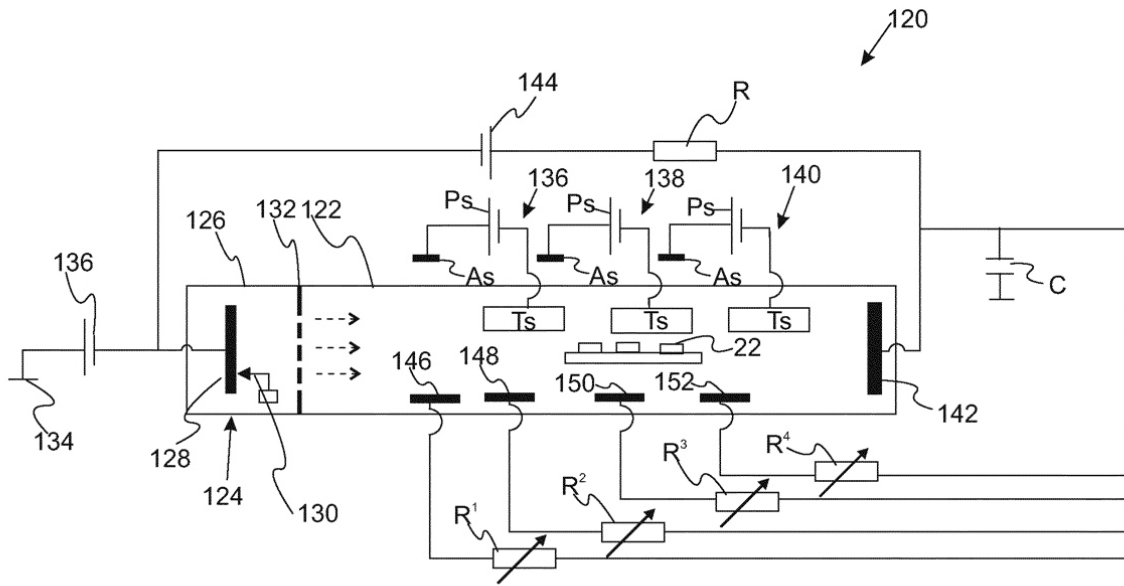


Fig. 4B

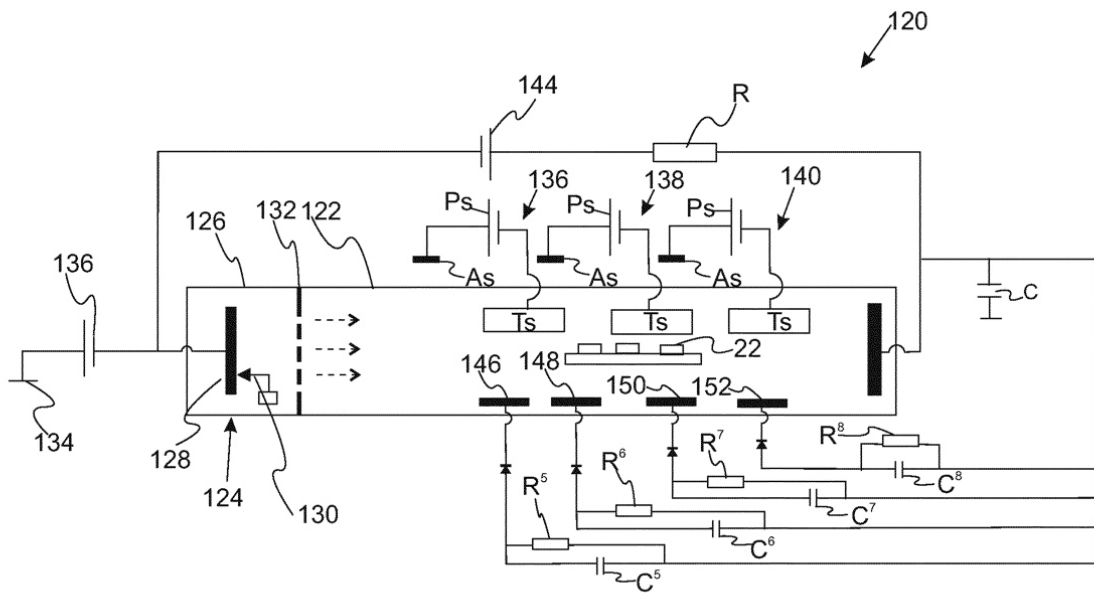


Fig. 4C

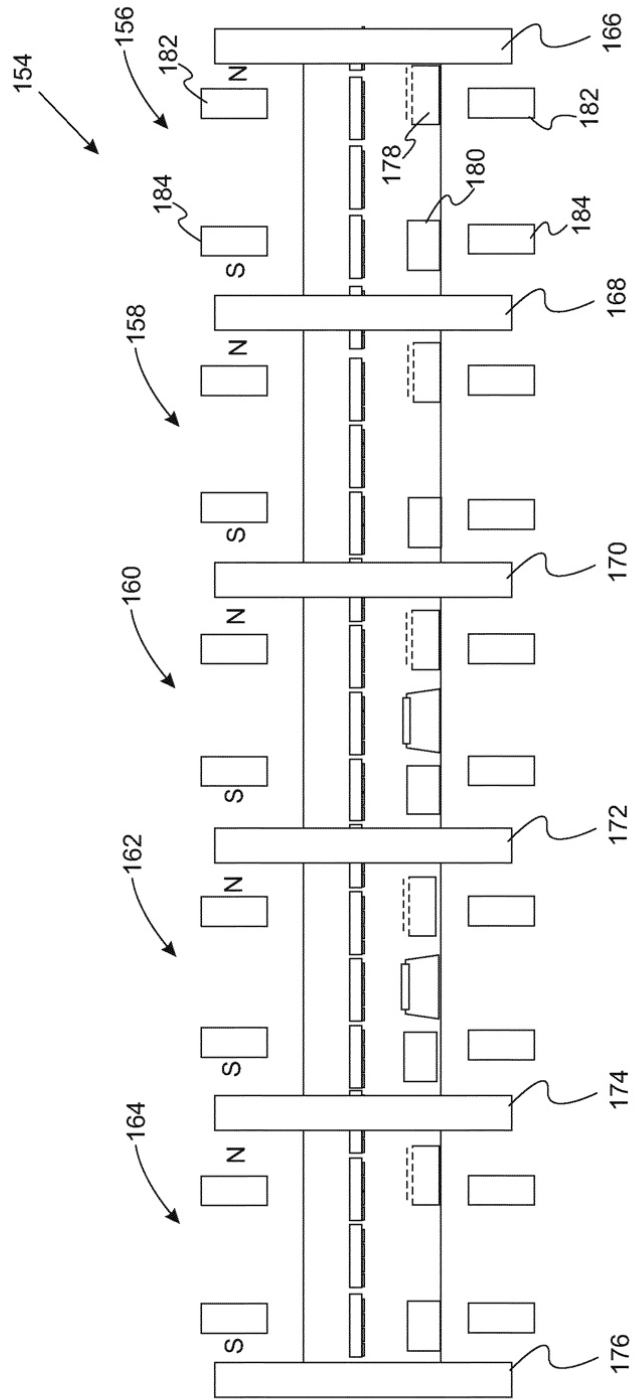


Fig. 5

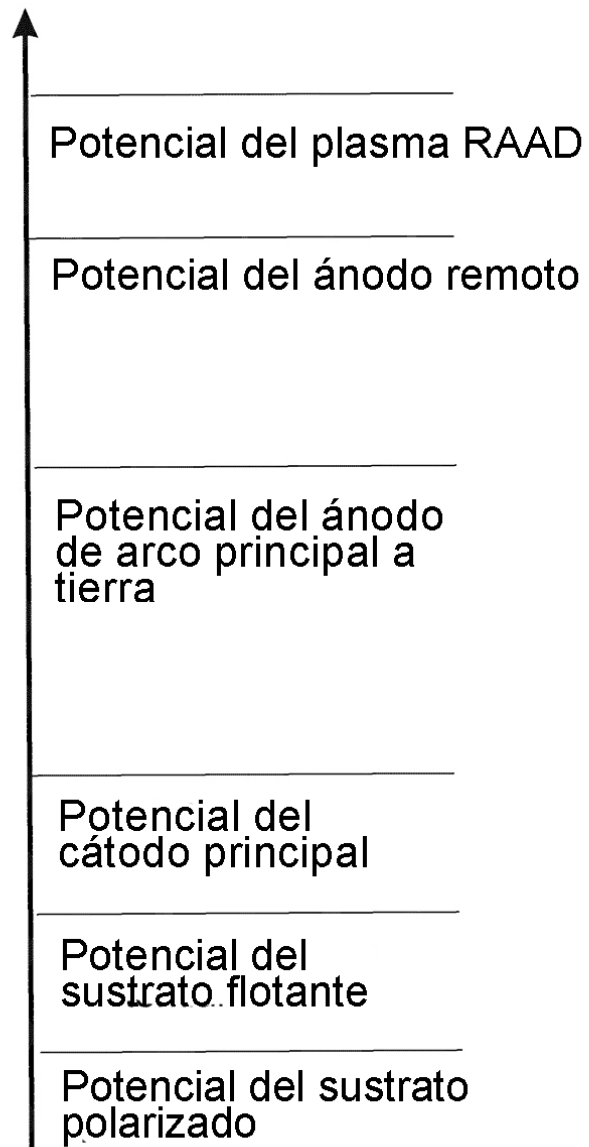


Fig. 6

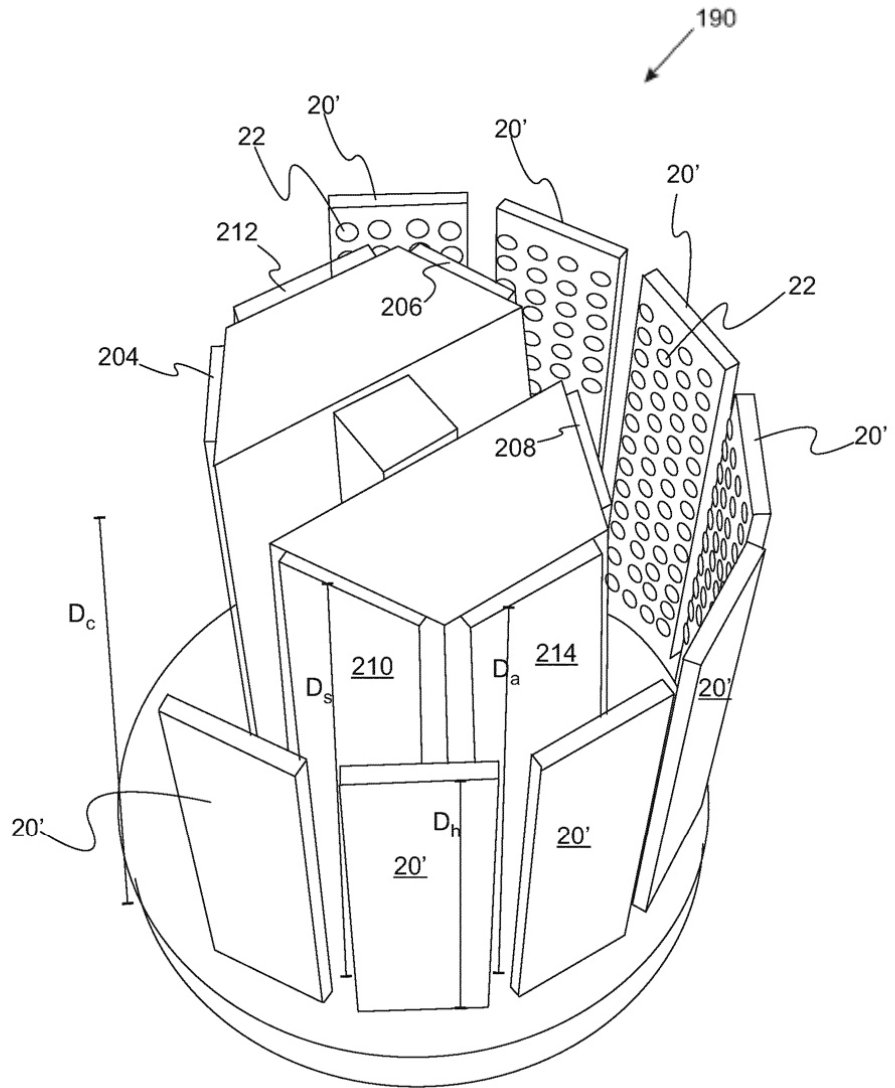


Fig. 7B

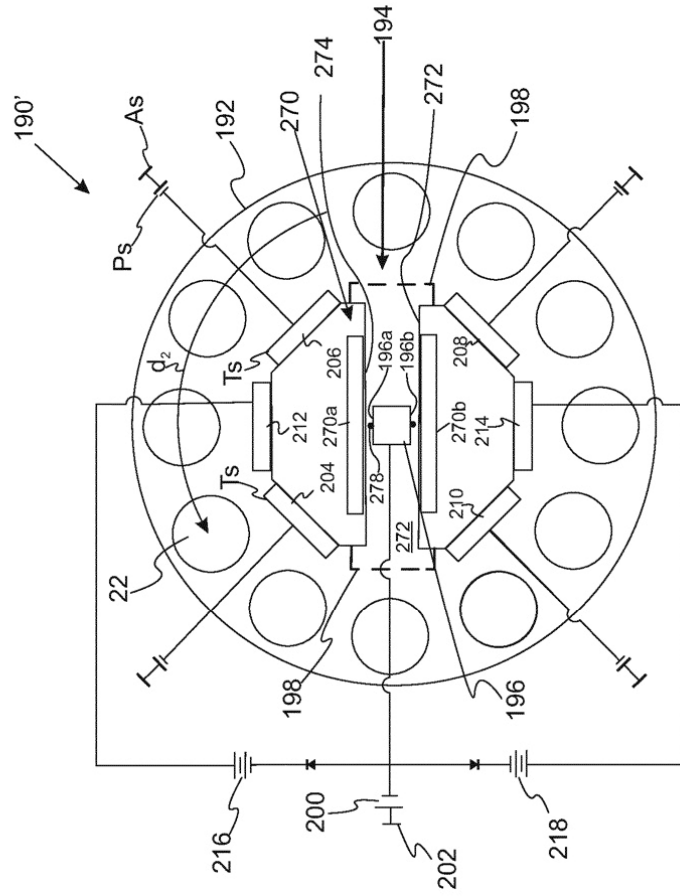


Fig. 8A

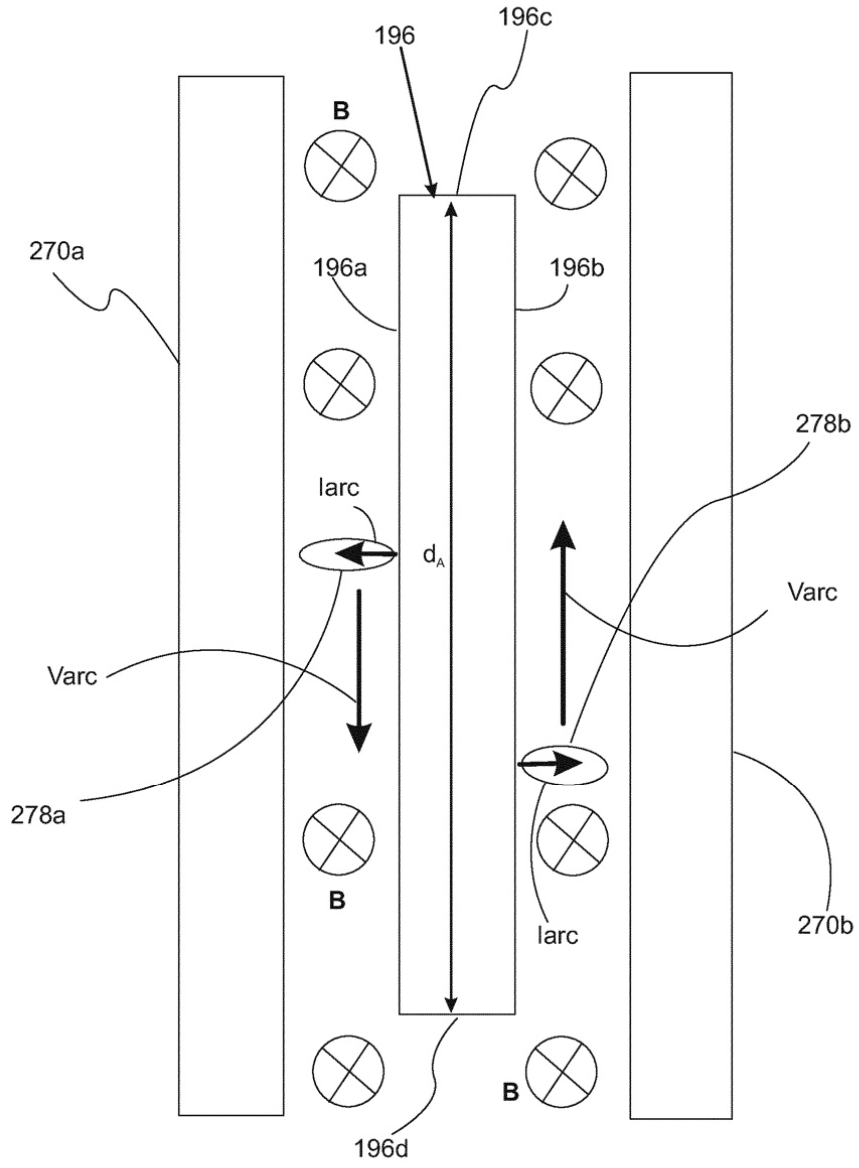


Fig. 8B

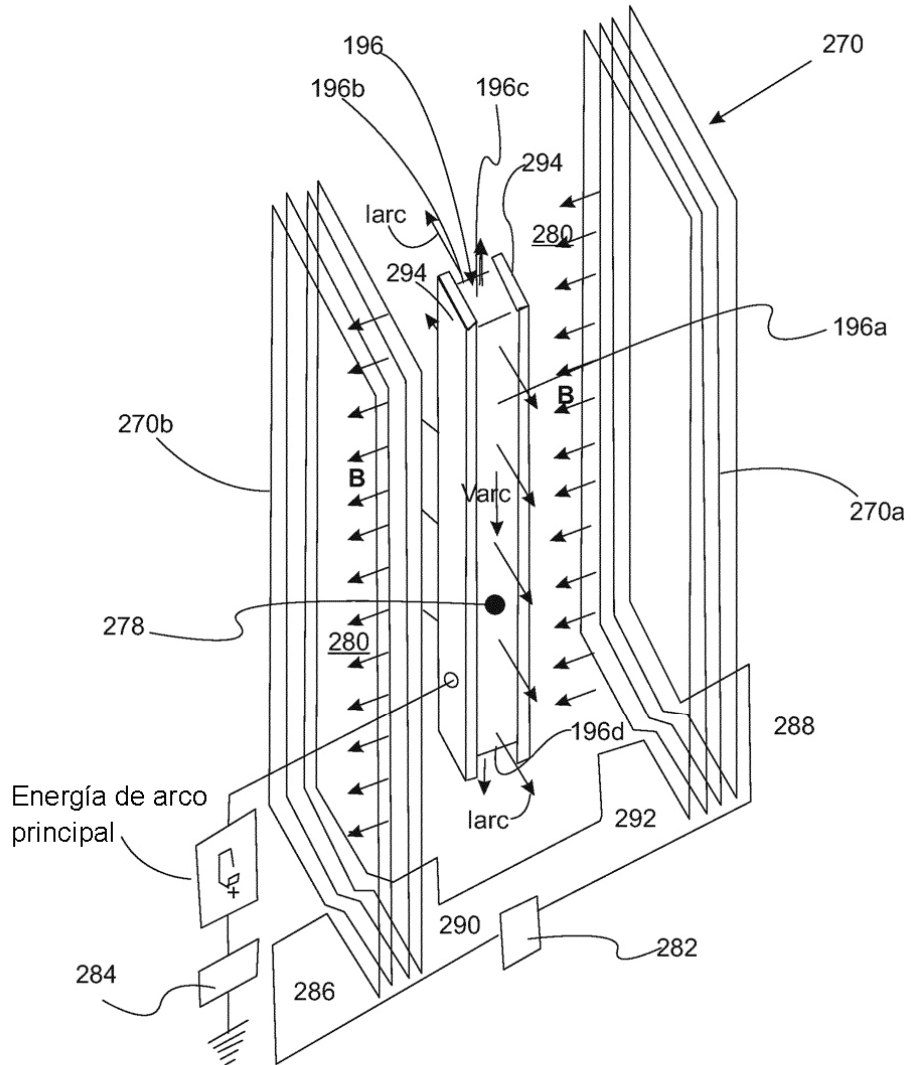


Fig. 8C

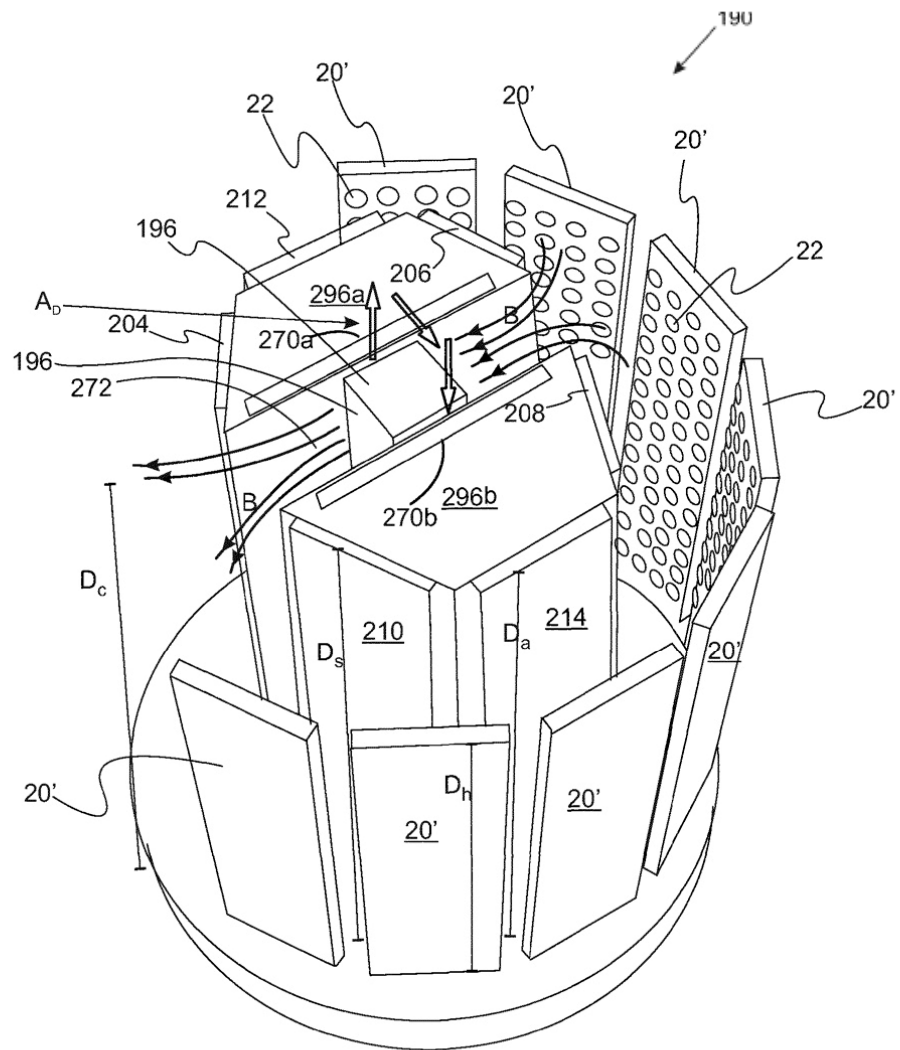


Fig. 8D

190'

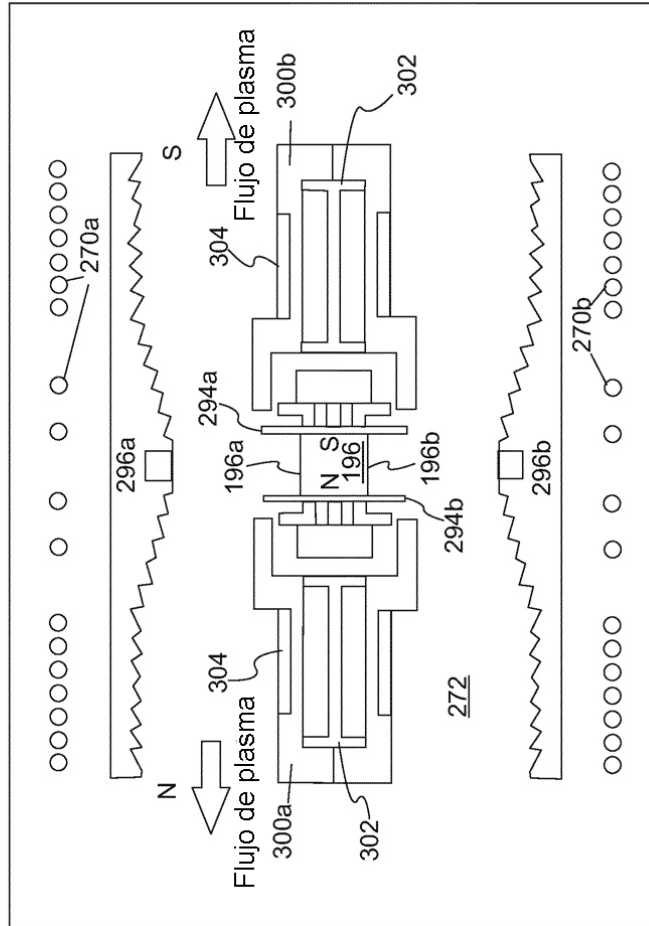


Fig. 8E

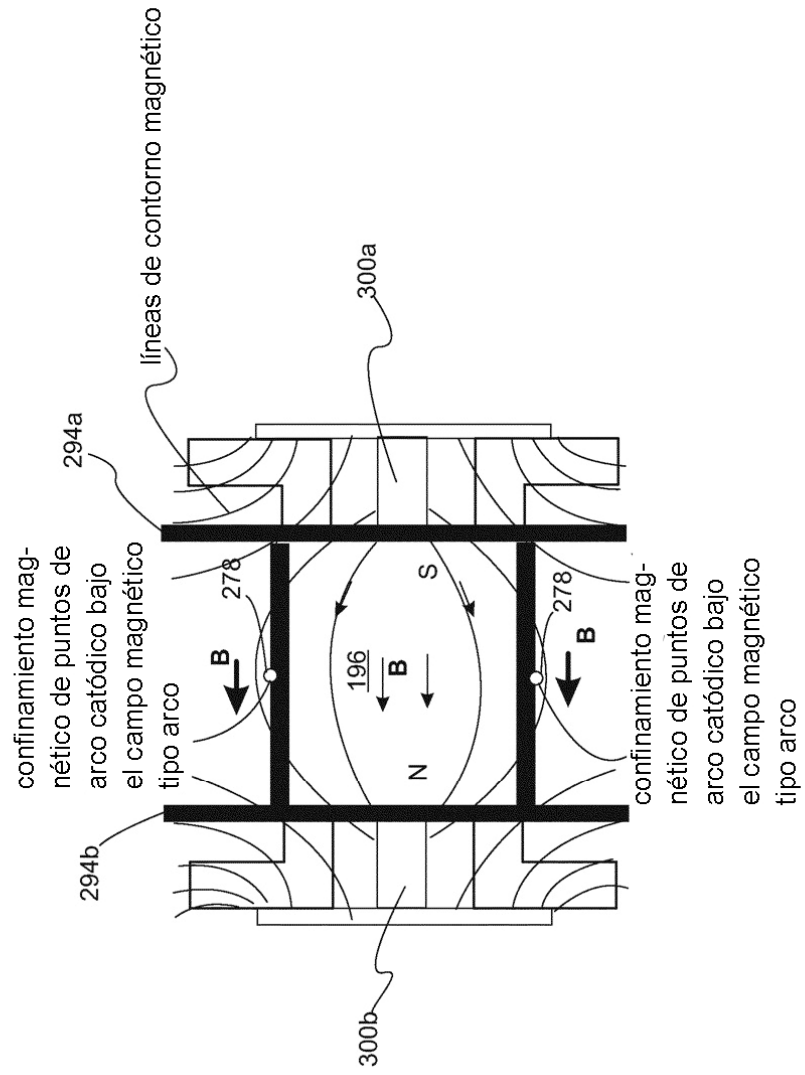


Fig. 8F

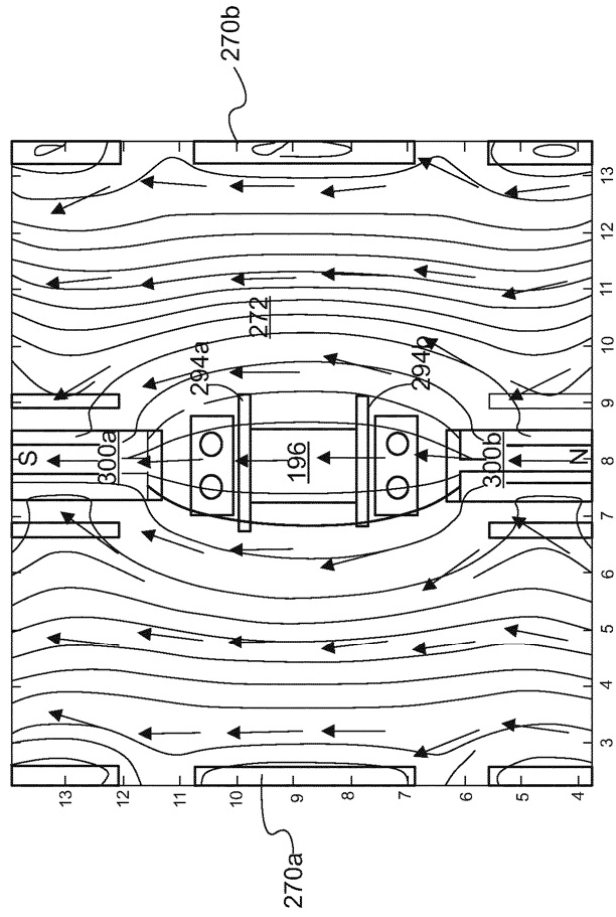


Fig. 8G

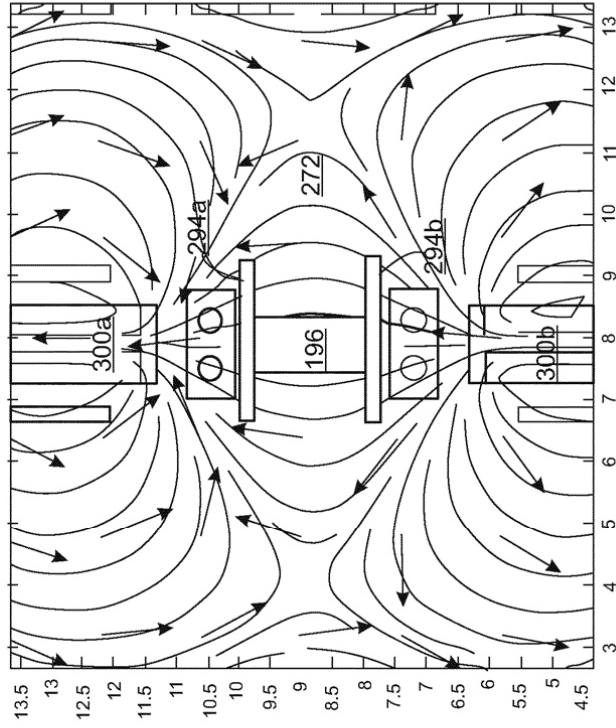


Fig. 8H

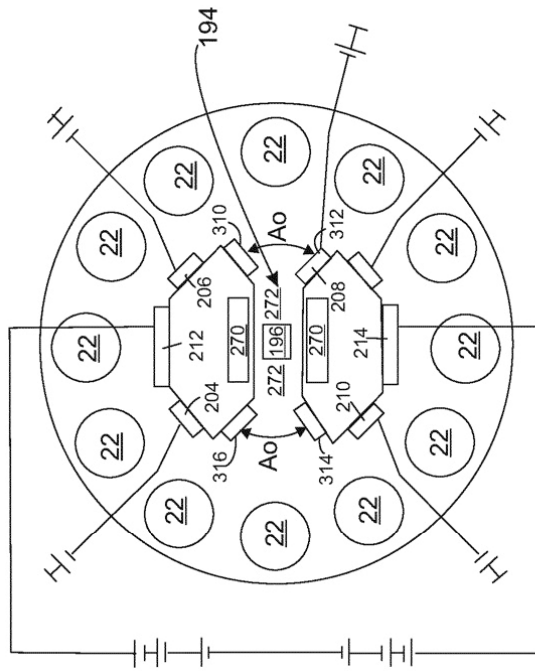


Fig. 9A

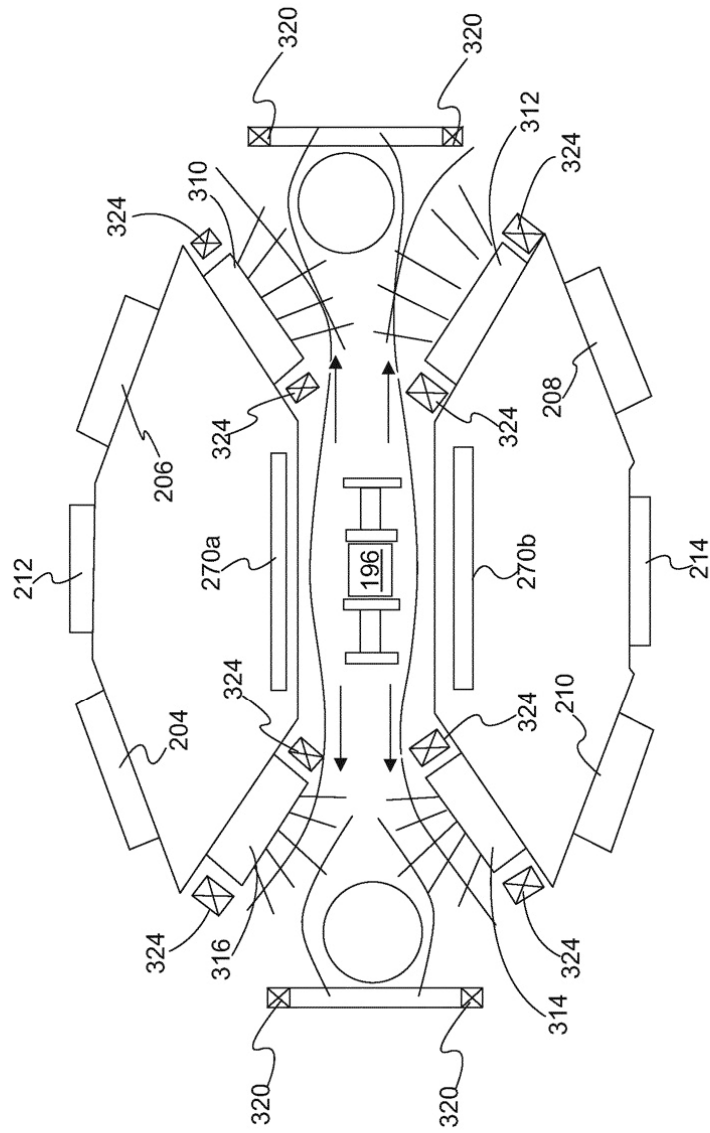


Fig. 9B

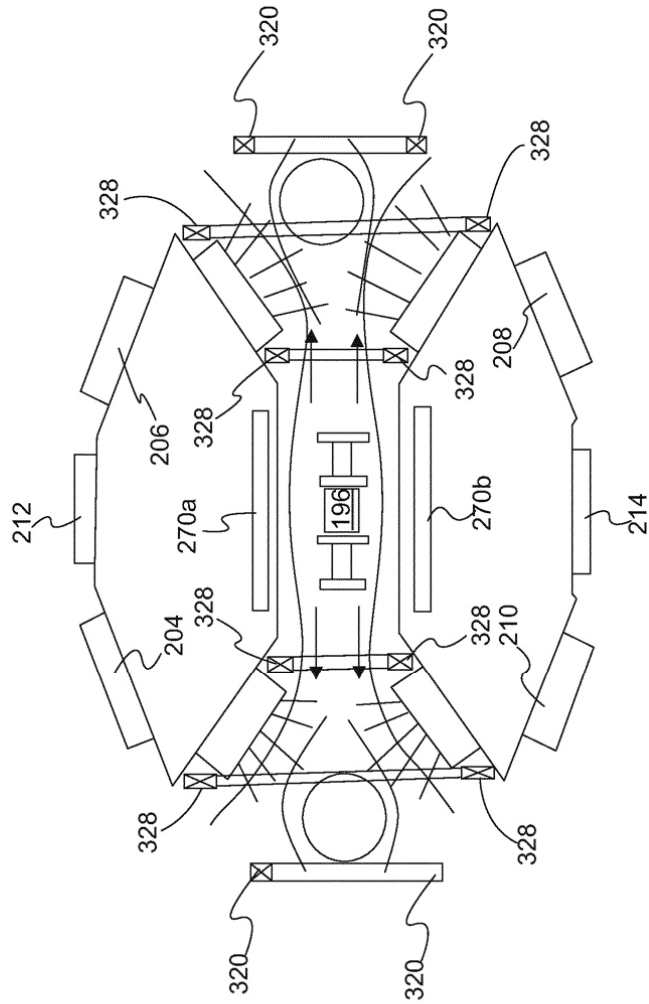


Fig. 9C

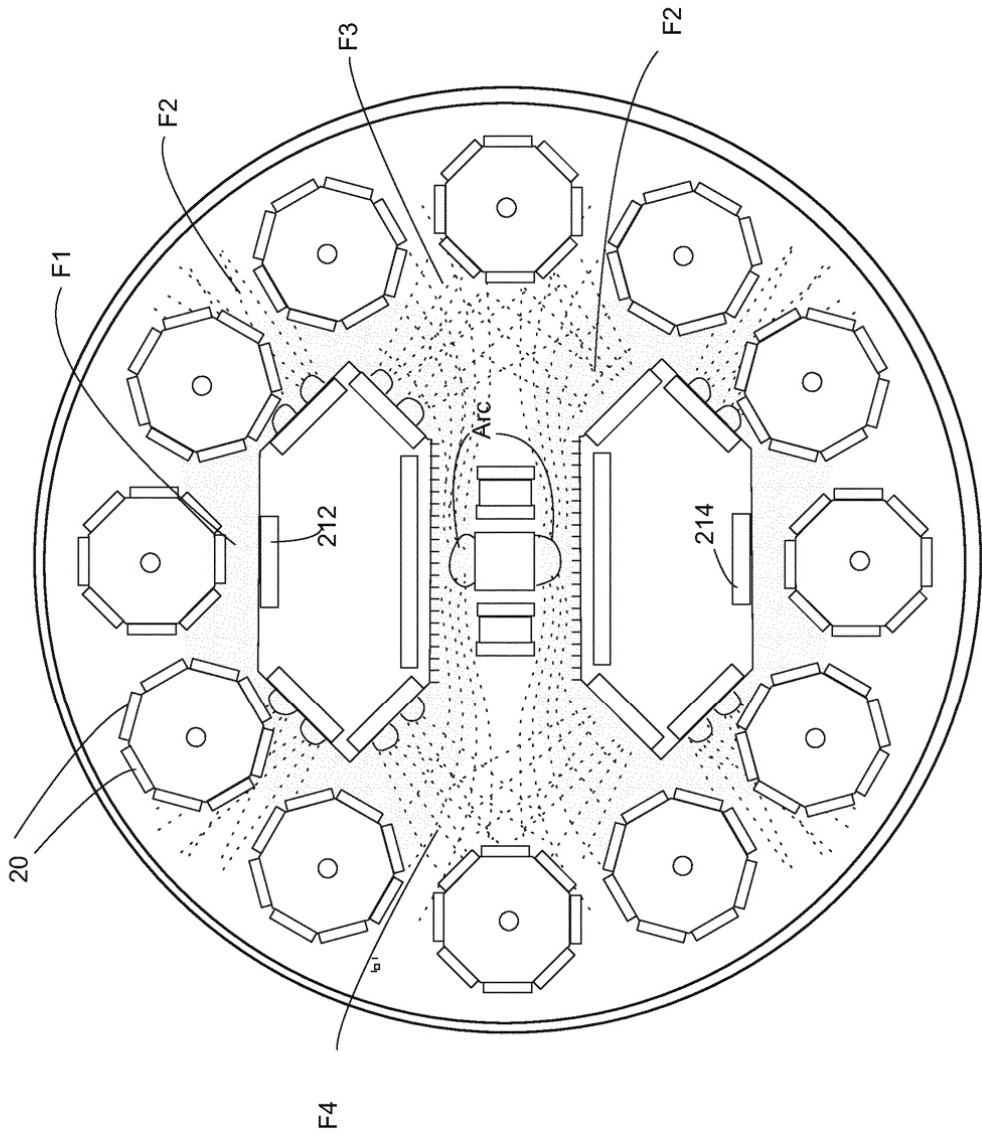


Fig. 9D

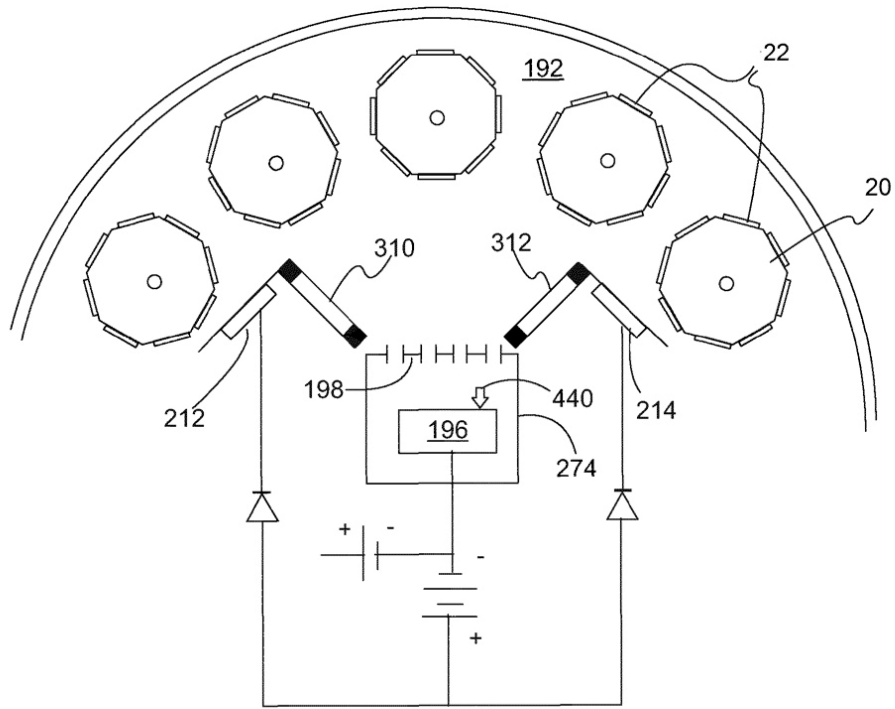


Fig. 9E

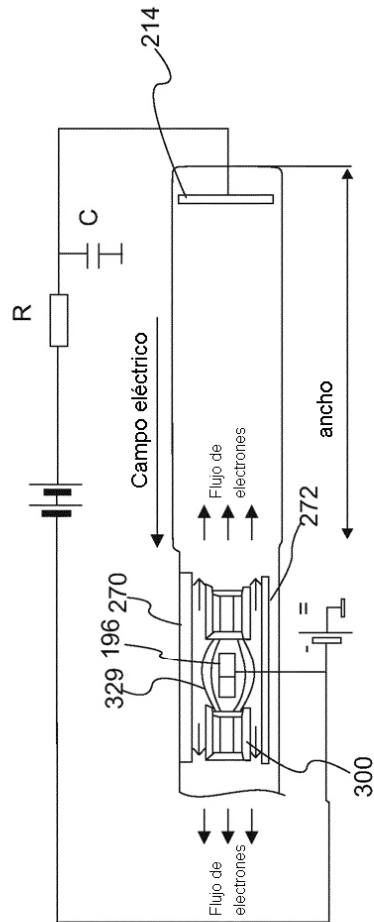


Fig. 10

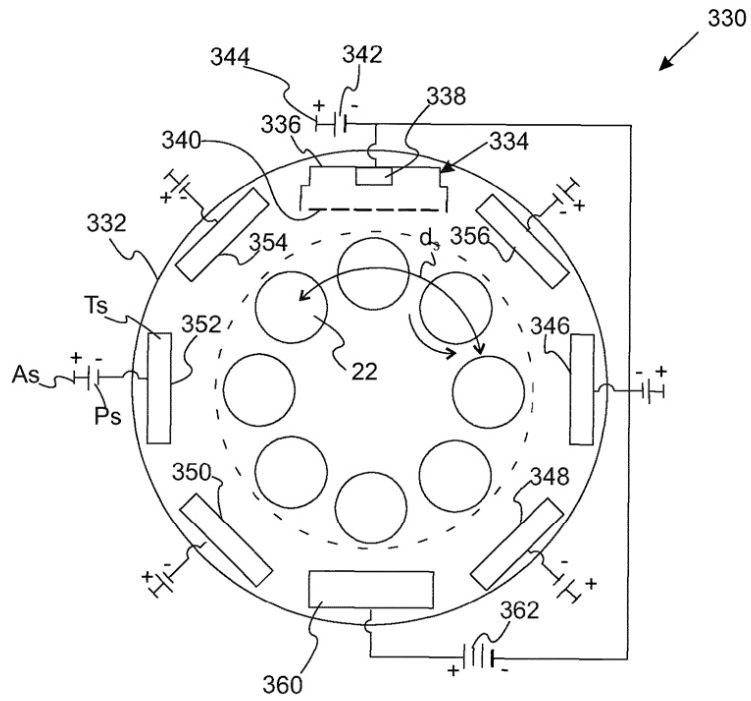


Fig. 11

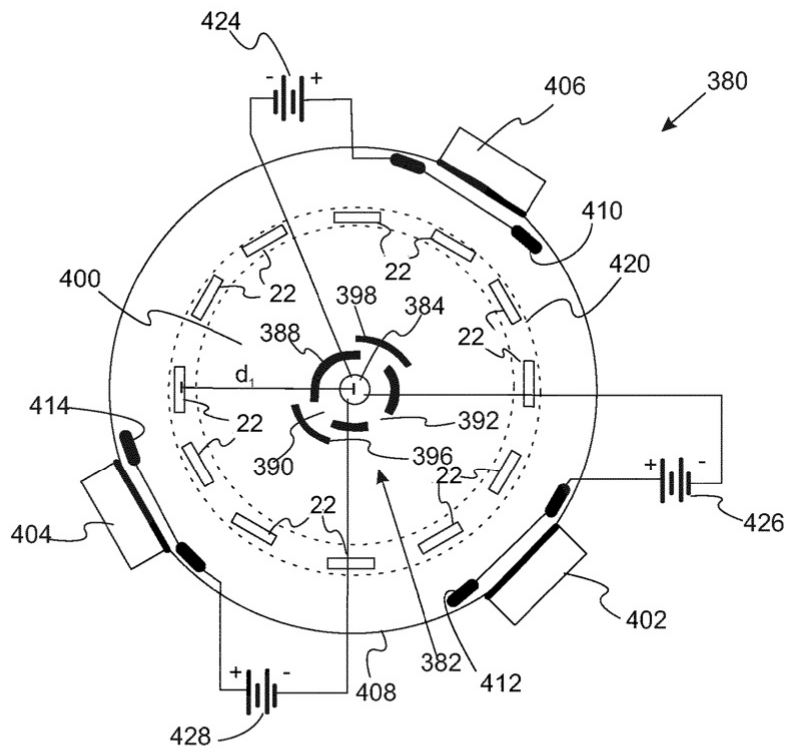


Fig. 12

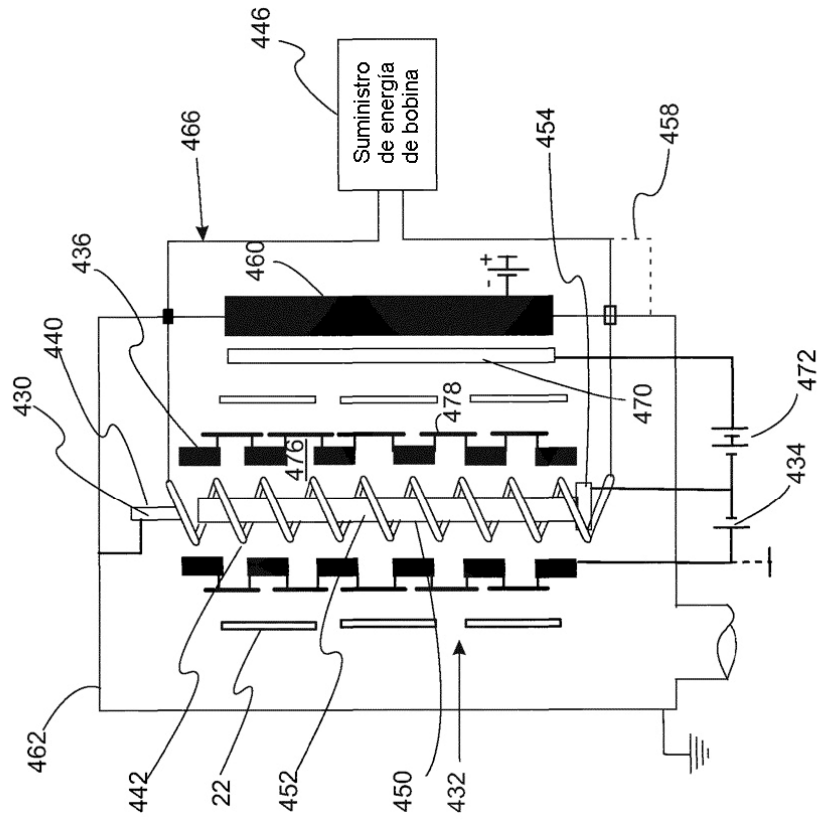


Fig. 13

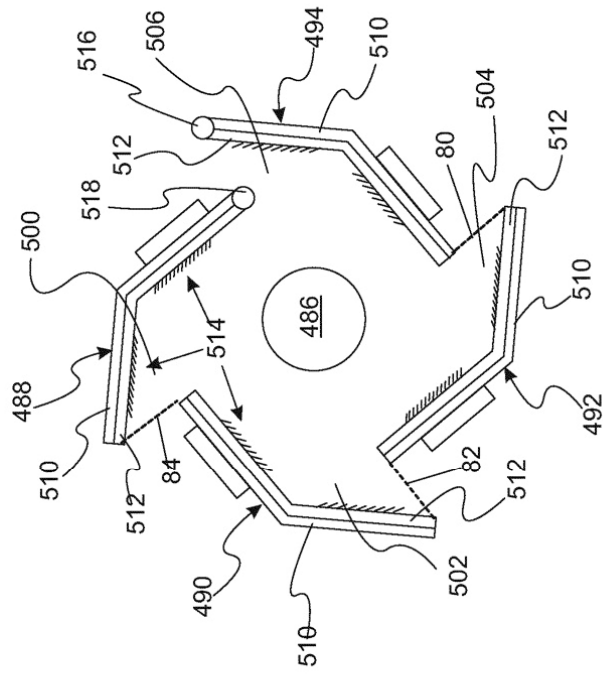


Fig. 14B

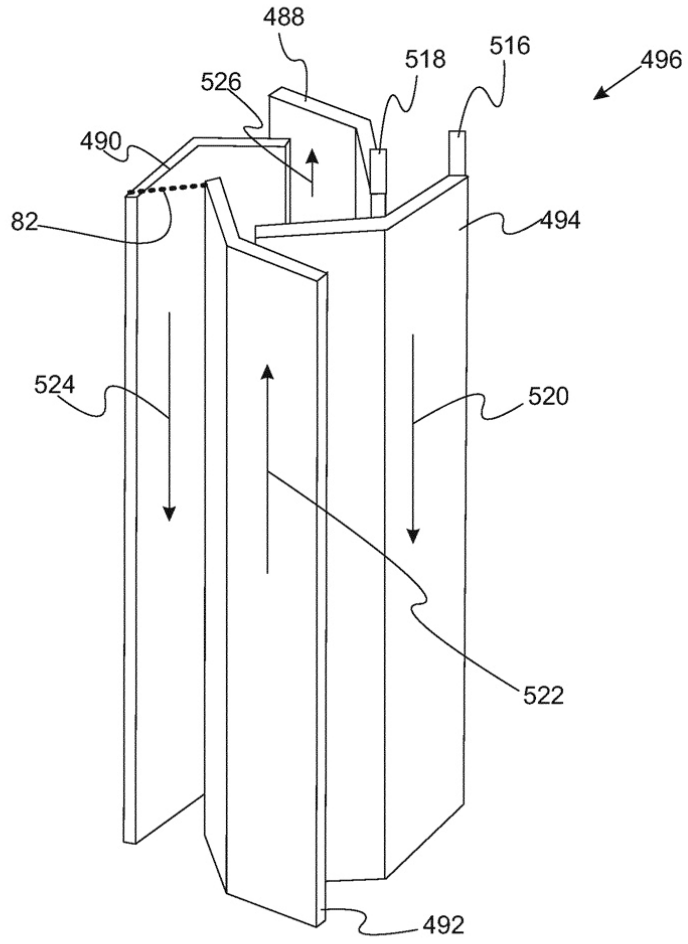


Fig. 14C

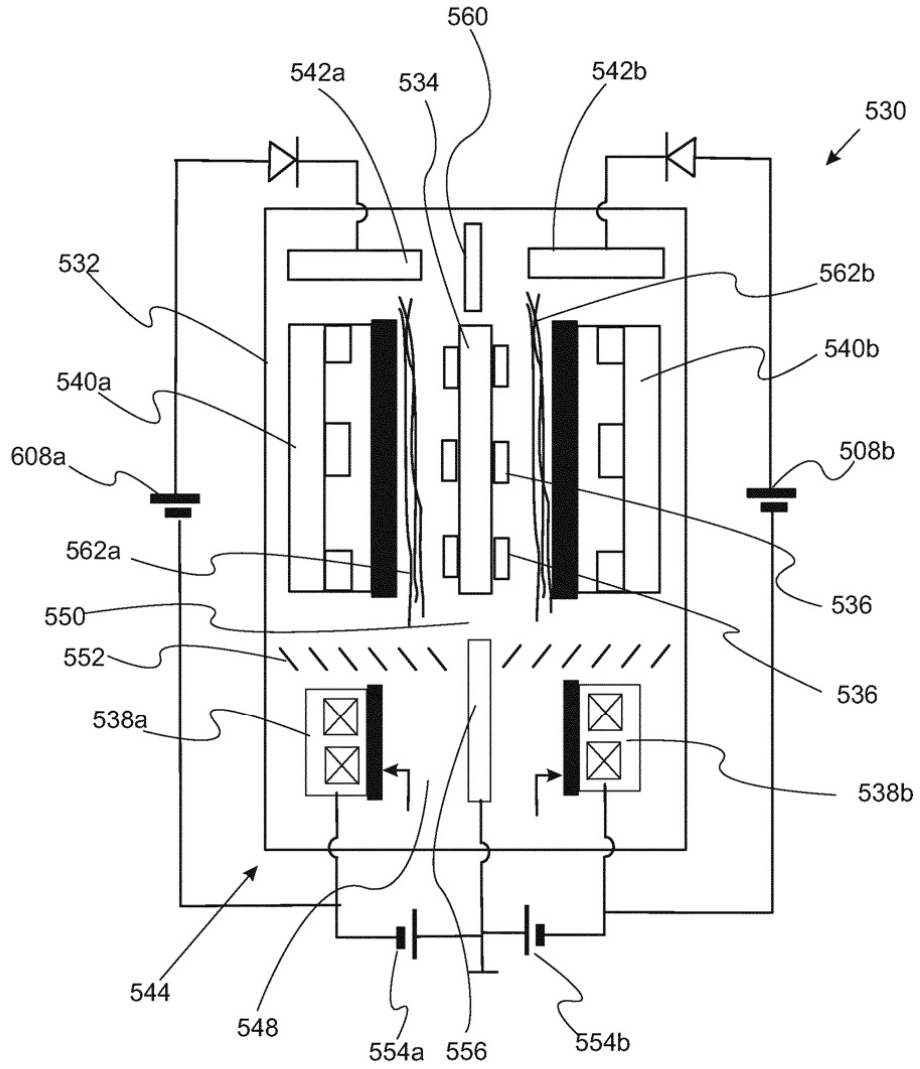


Fig. 15A

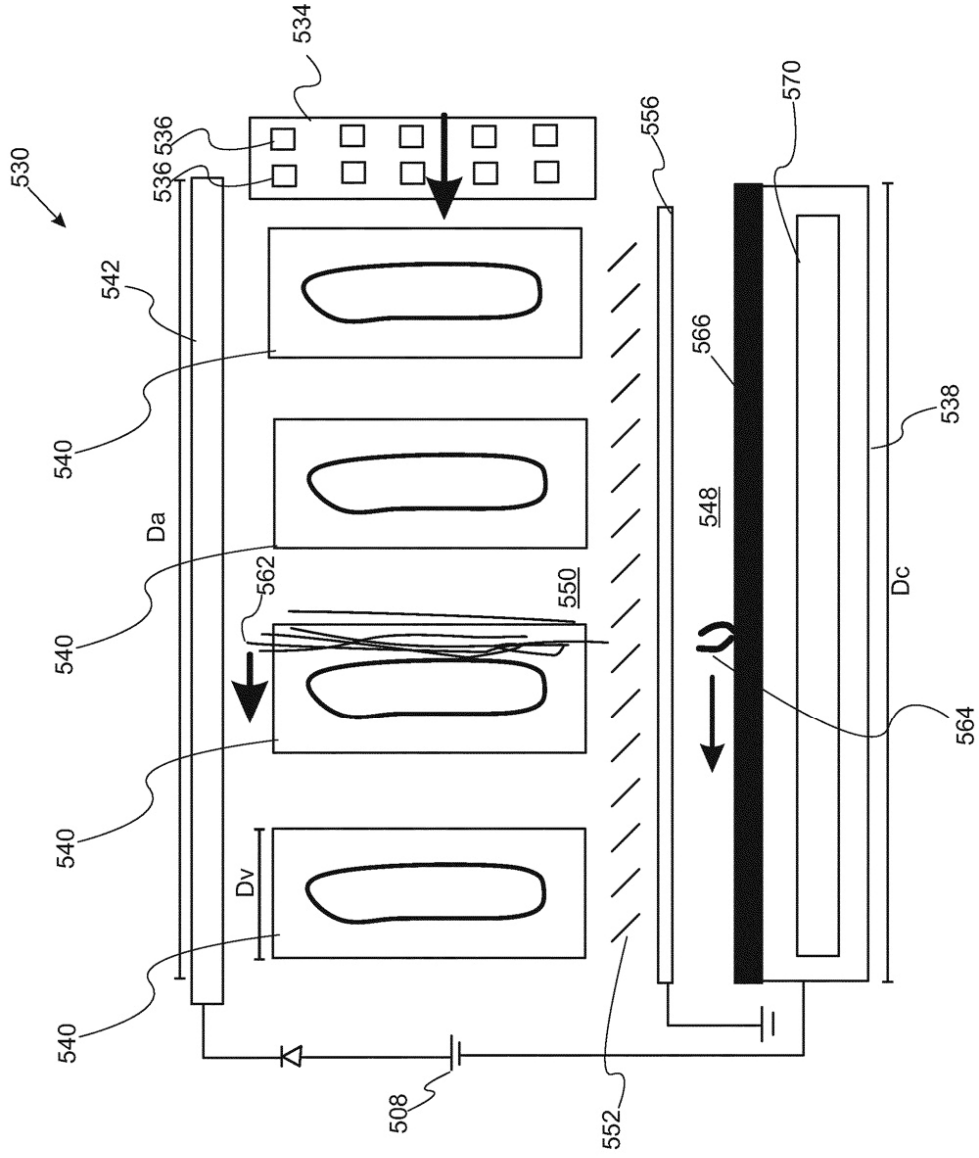


Fig. 15B

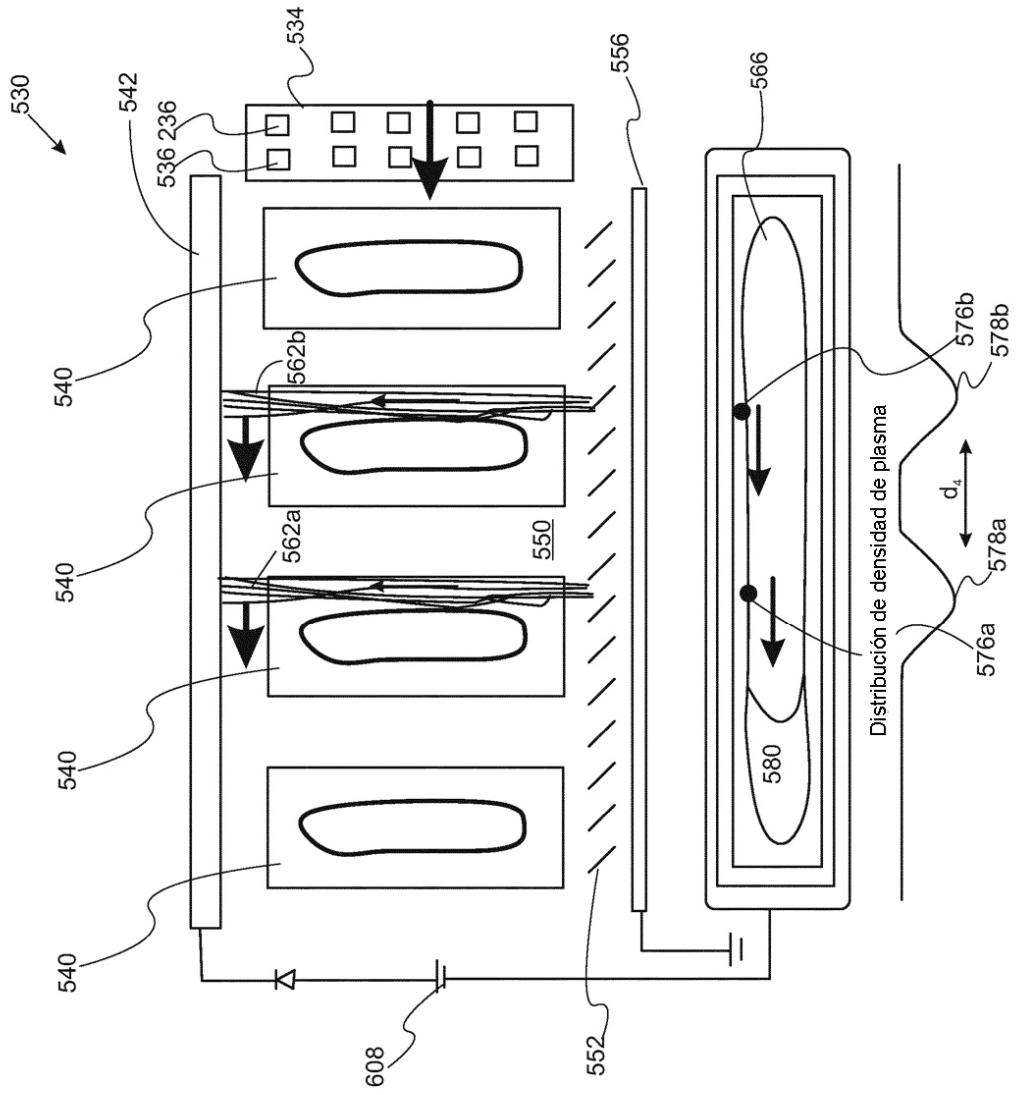


Fig. 16

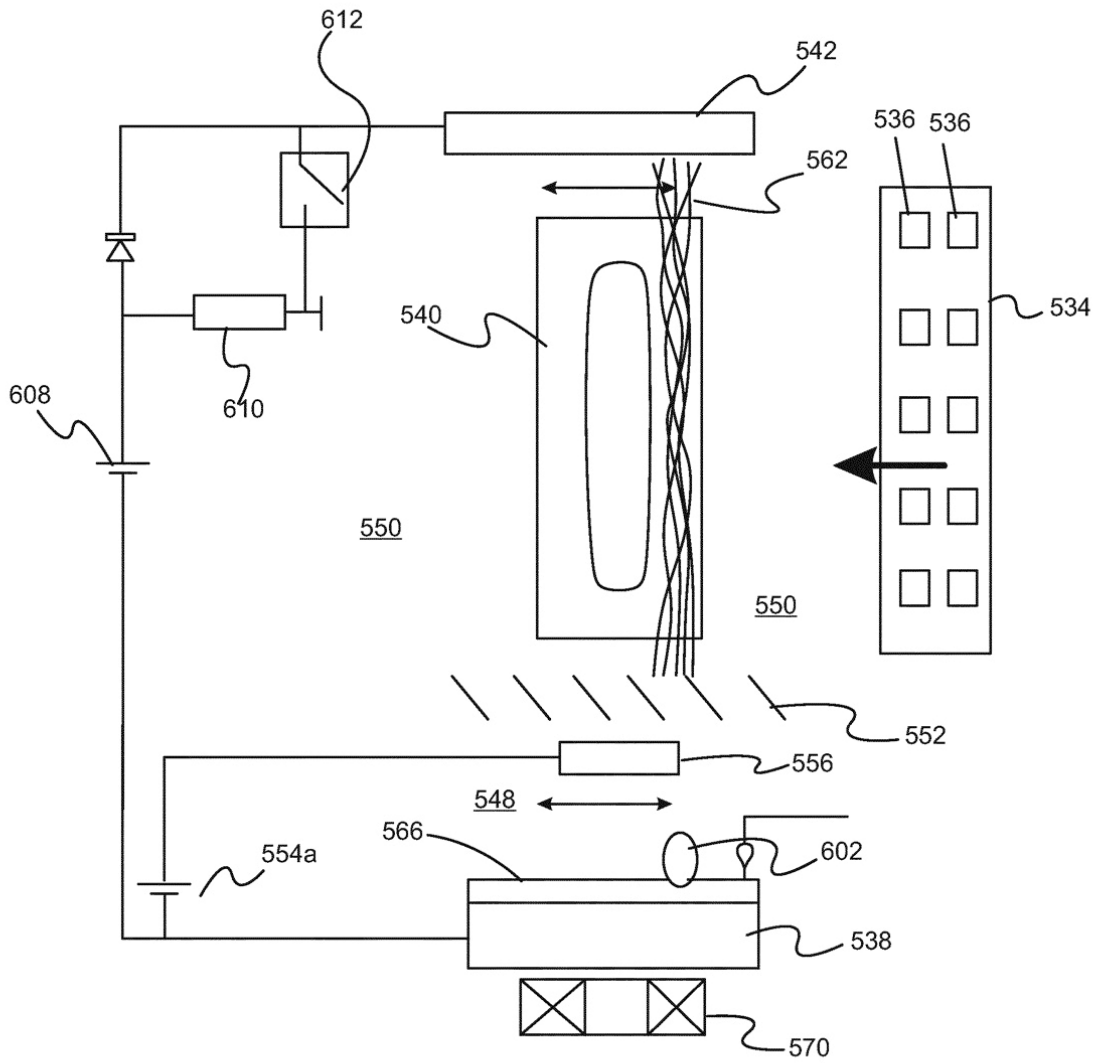


Fig. 18A

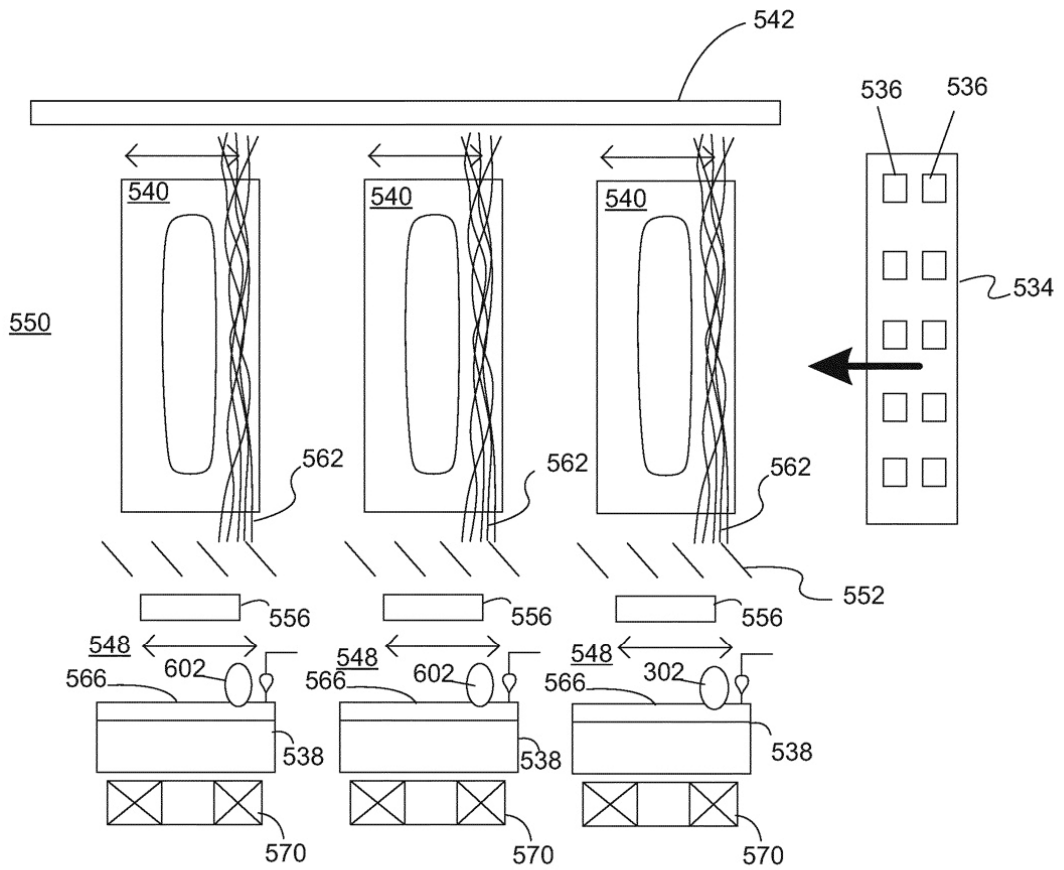


Fig. 18B

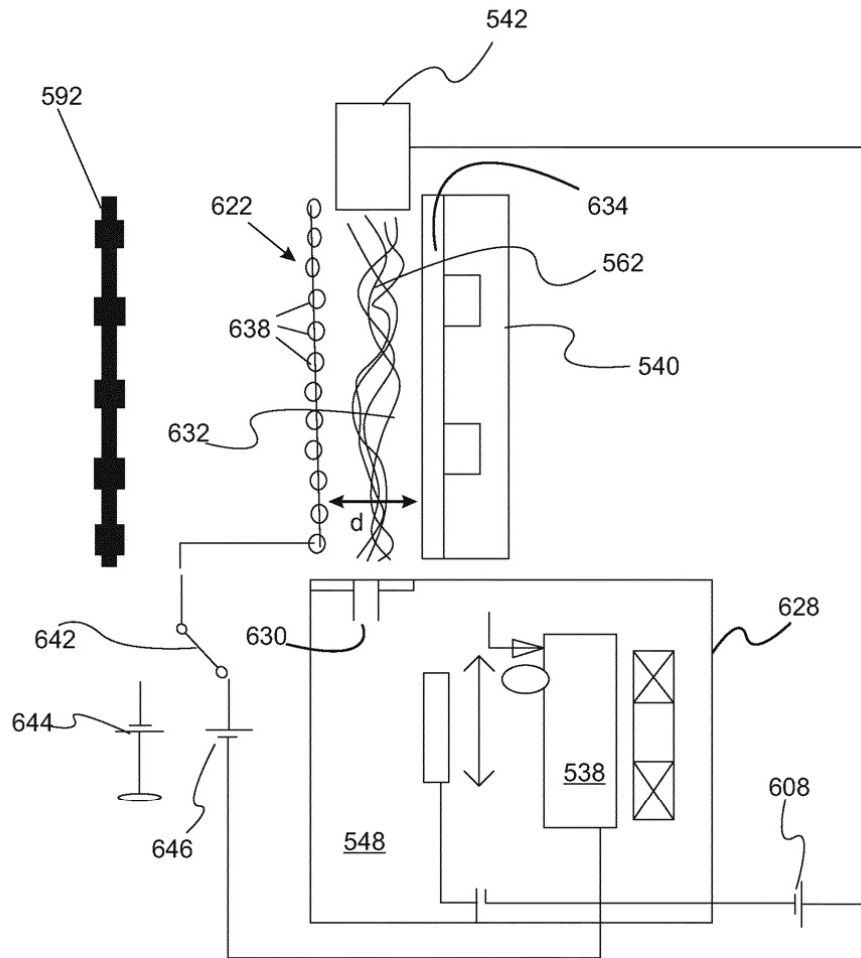


Fig. 19A

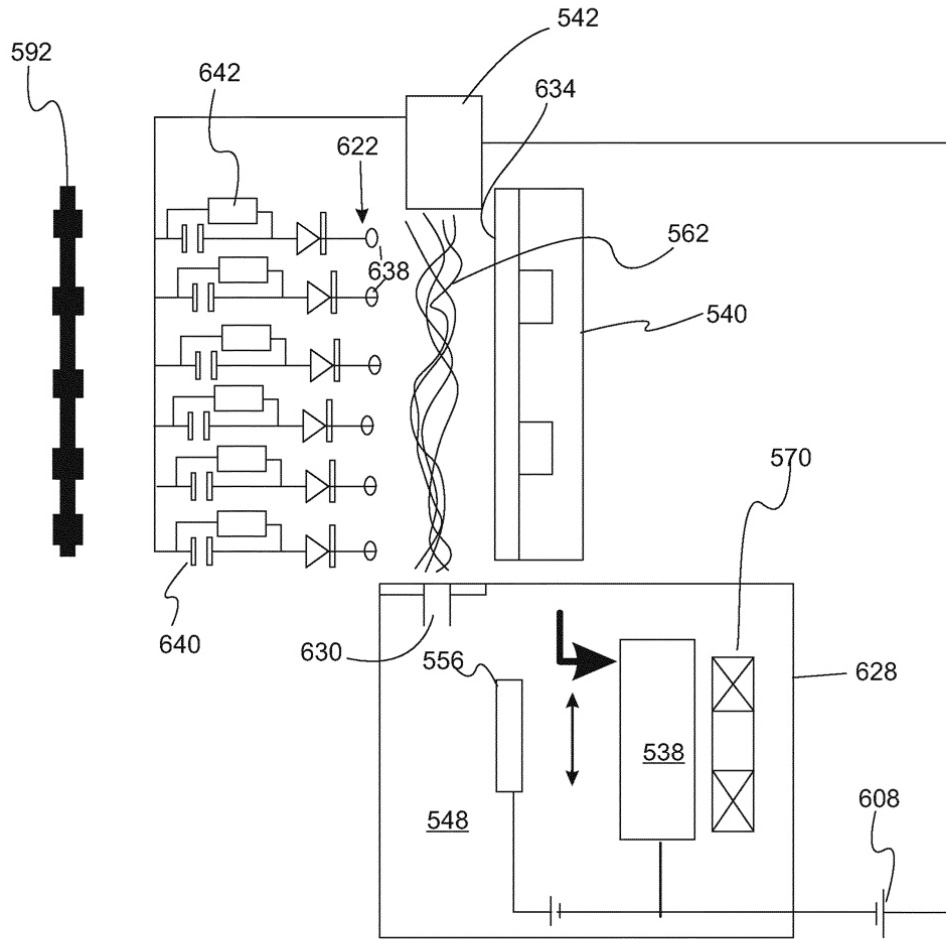


Fig. 19B

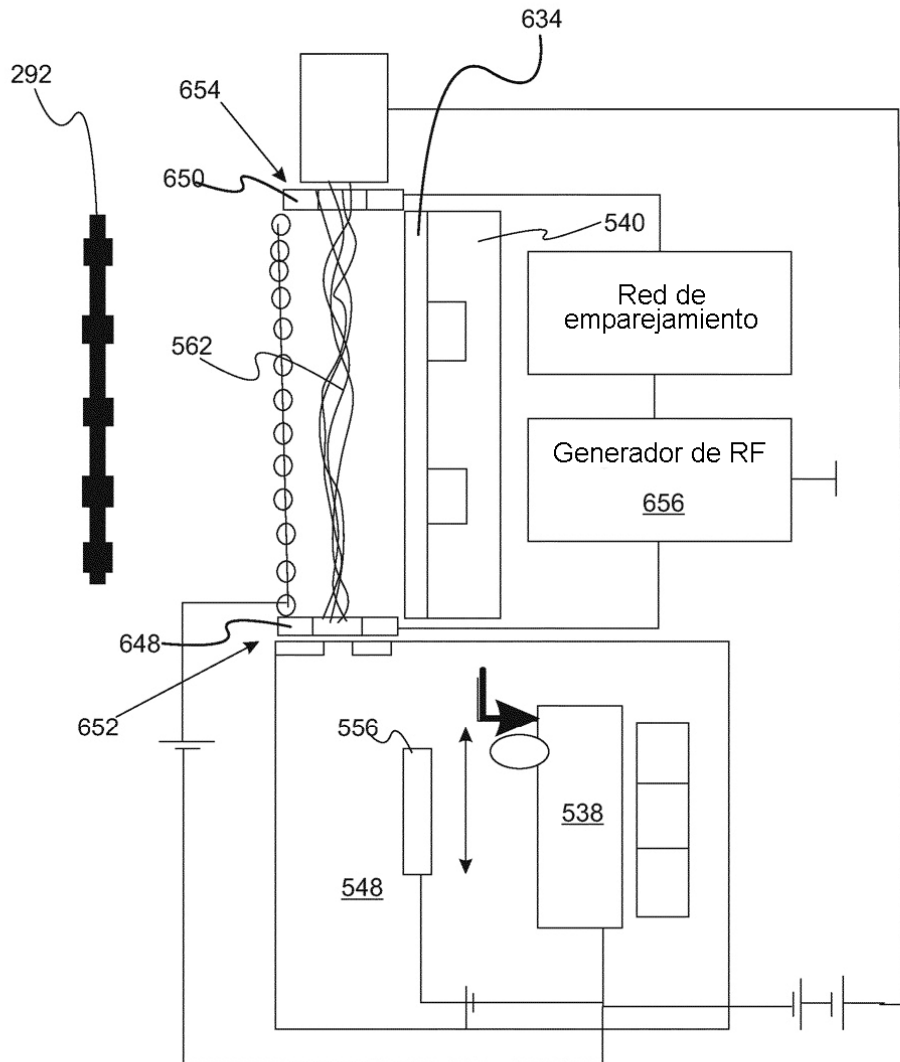


Fig. 19C

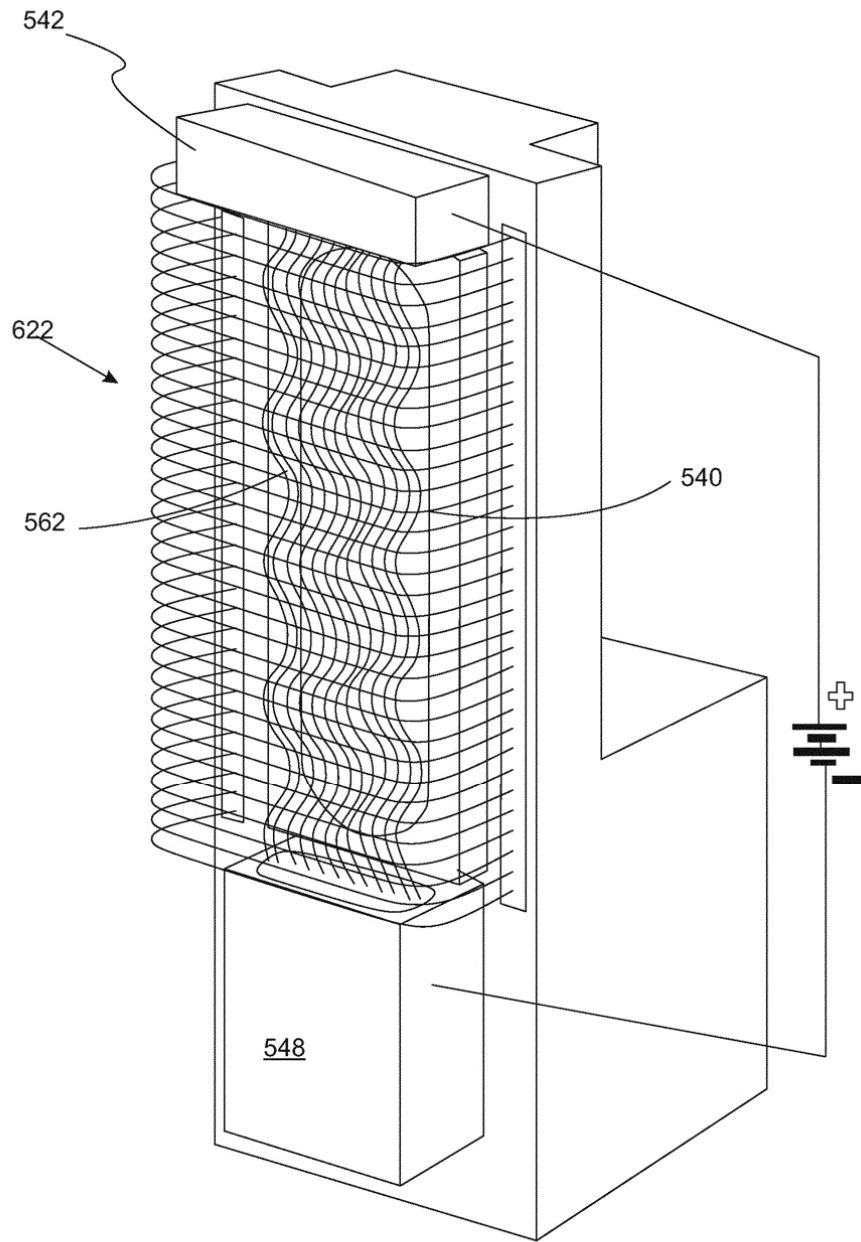


Fig. 19D

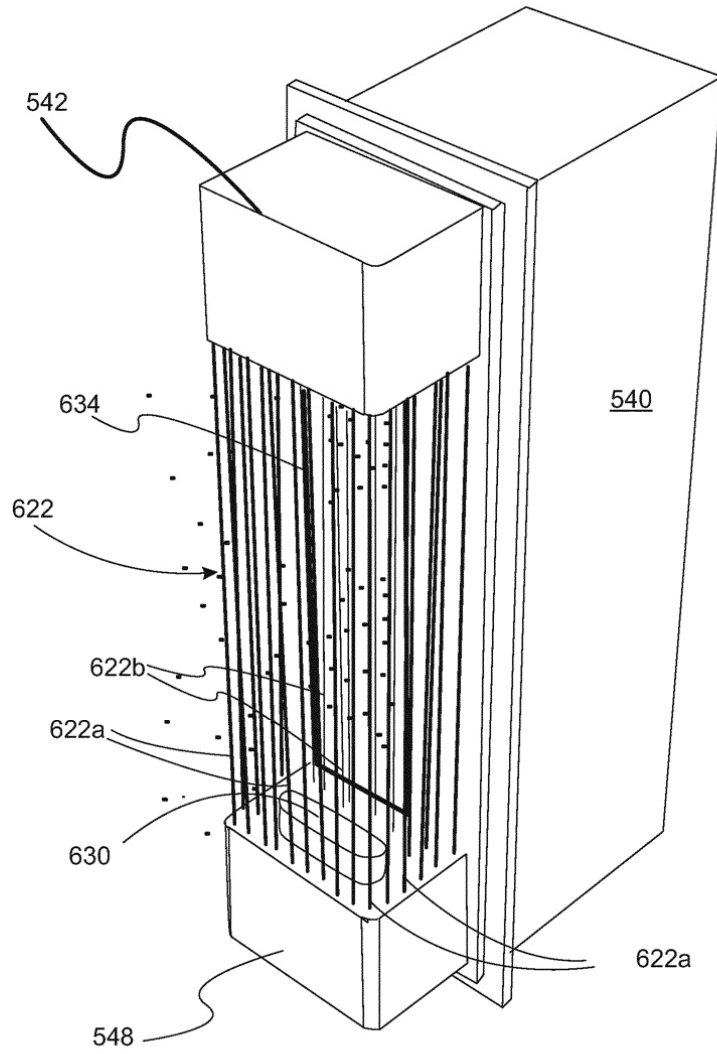


Fig. 19E

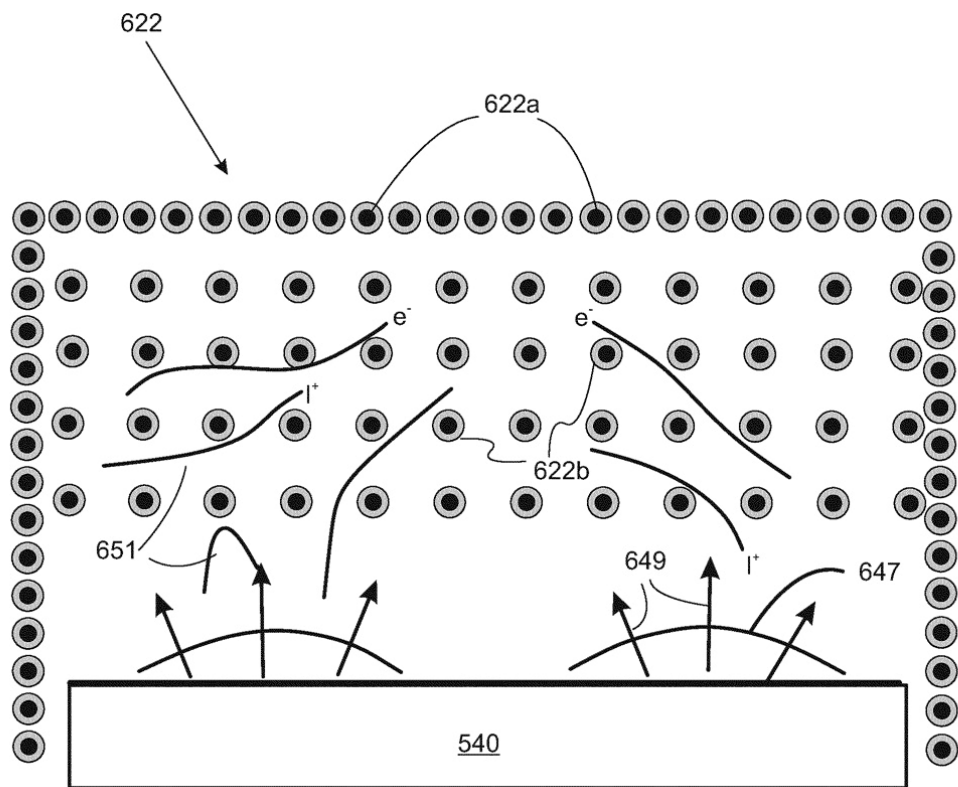


Fig. 19F

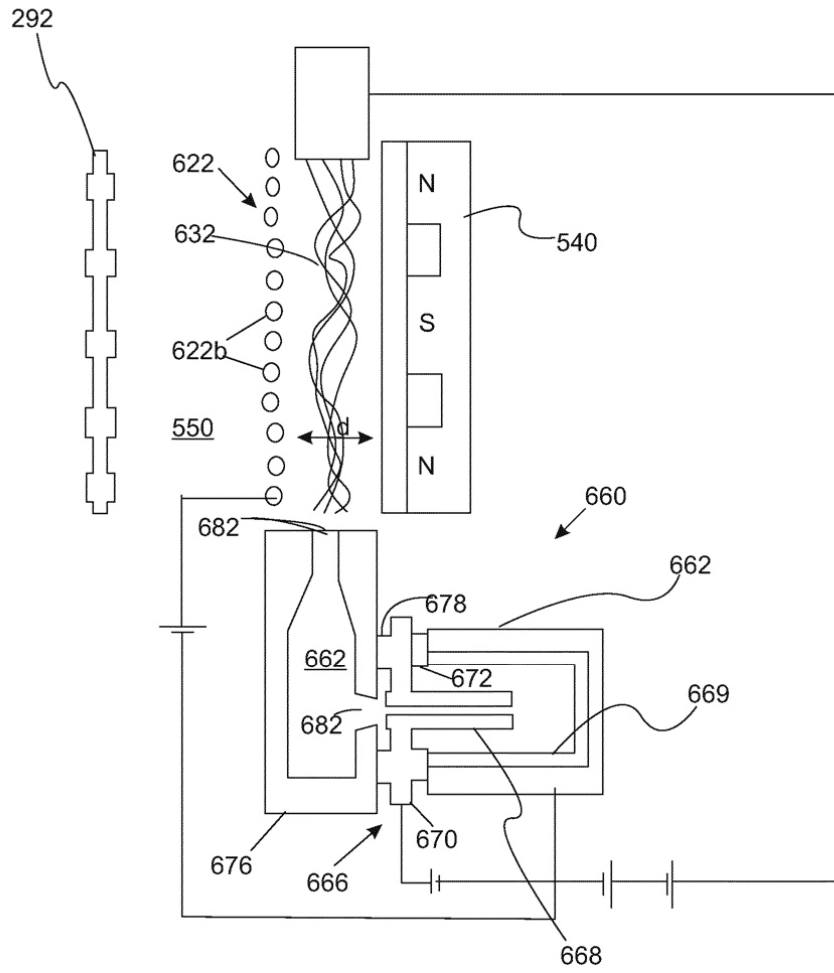


Fig. 20

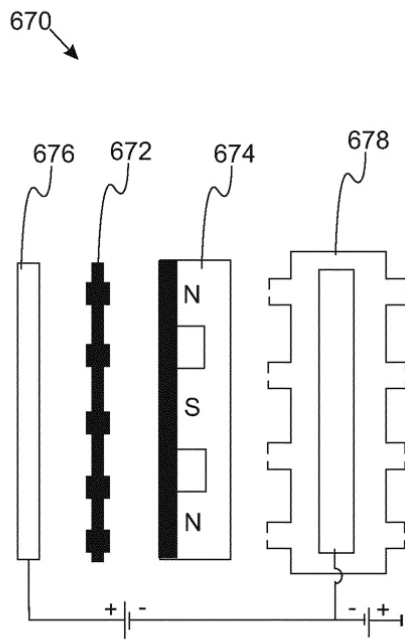


Fig. 21A

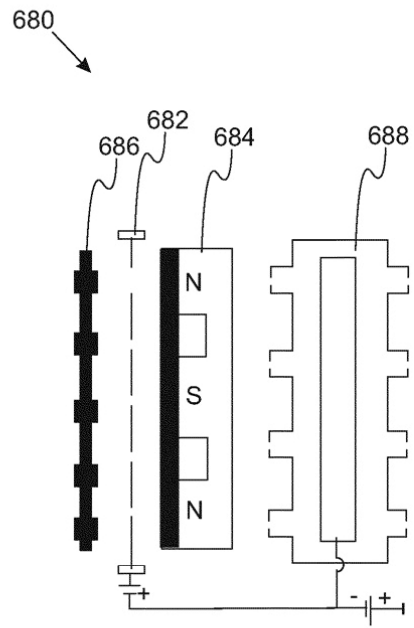


Fig. 21B

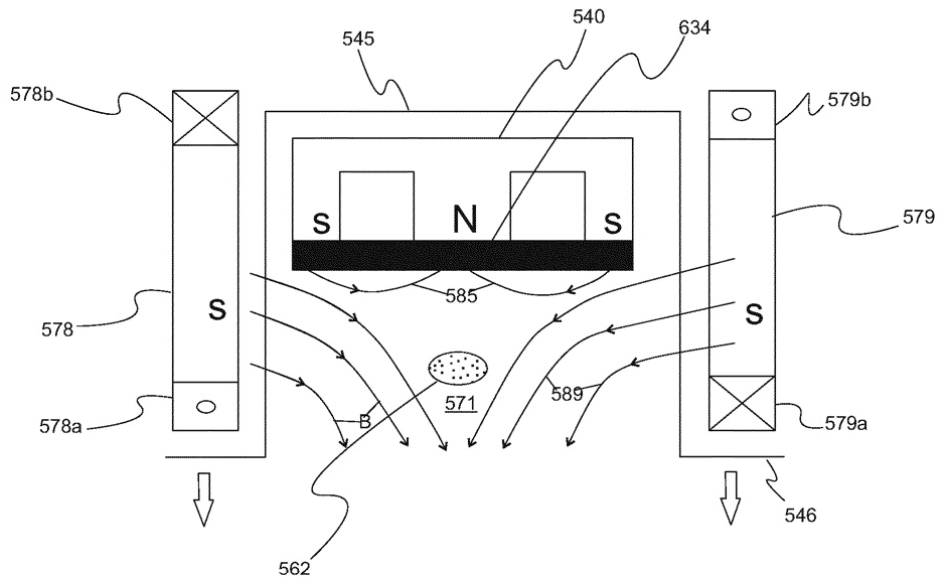
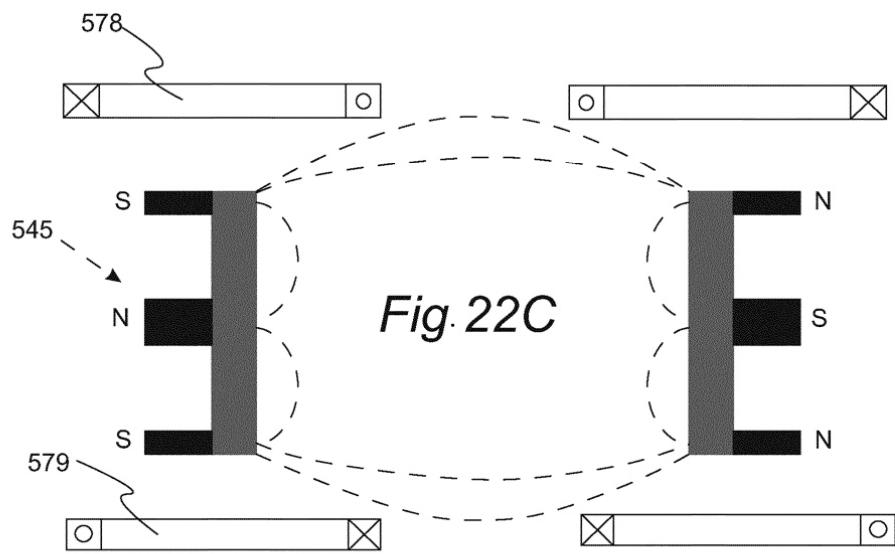
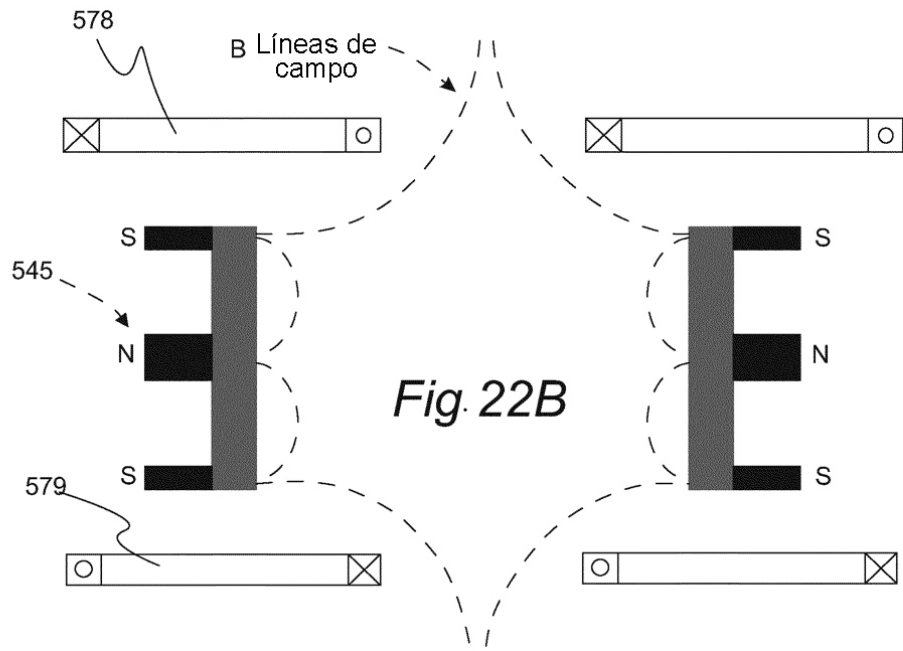


Fig. 22A



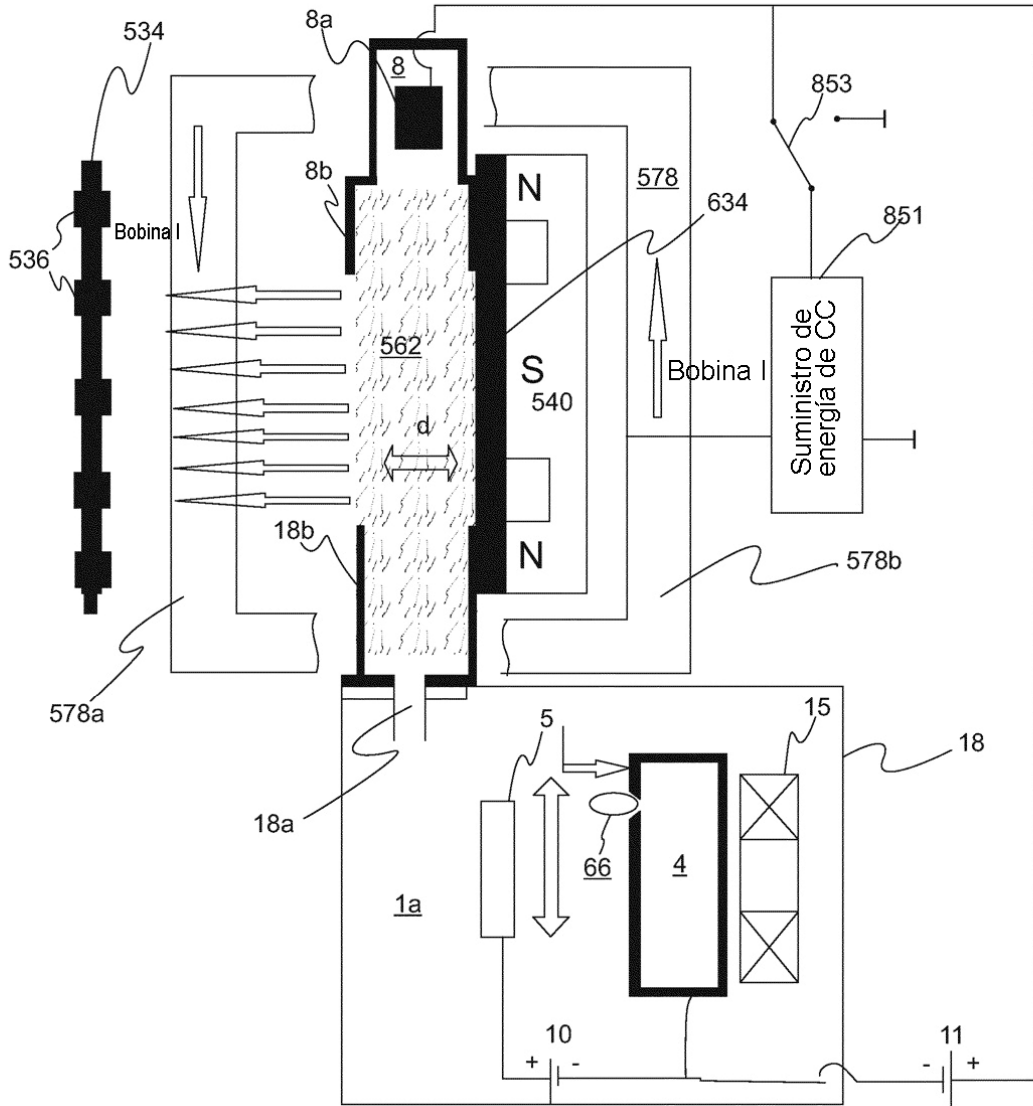


Fig. 22D

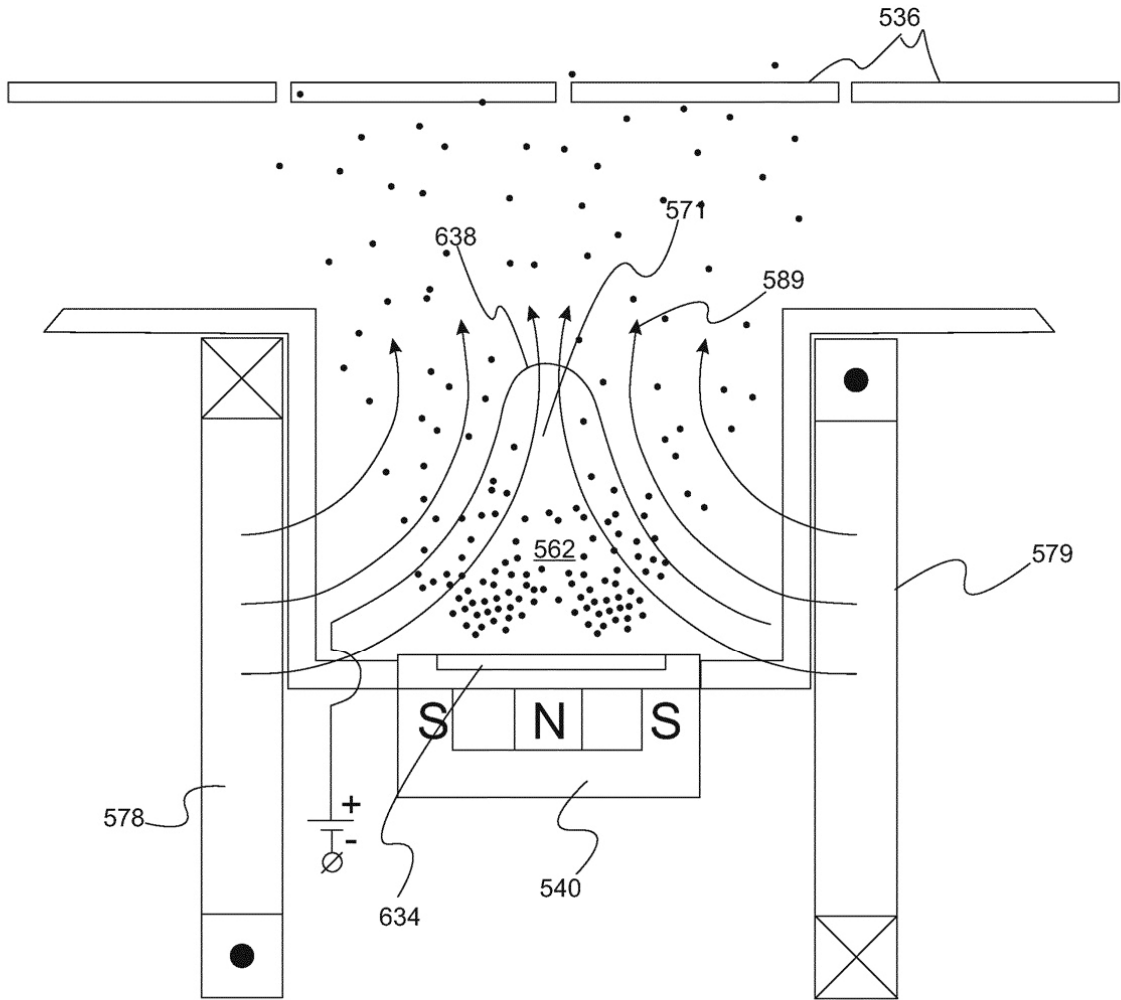


Fig. 22E

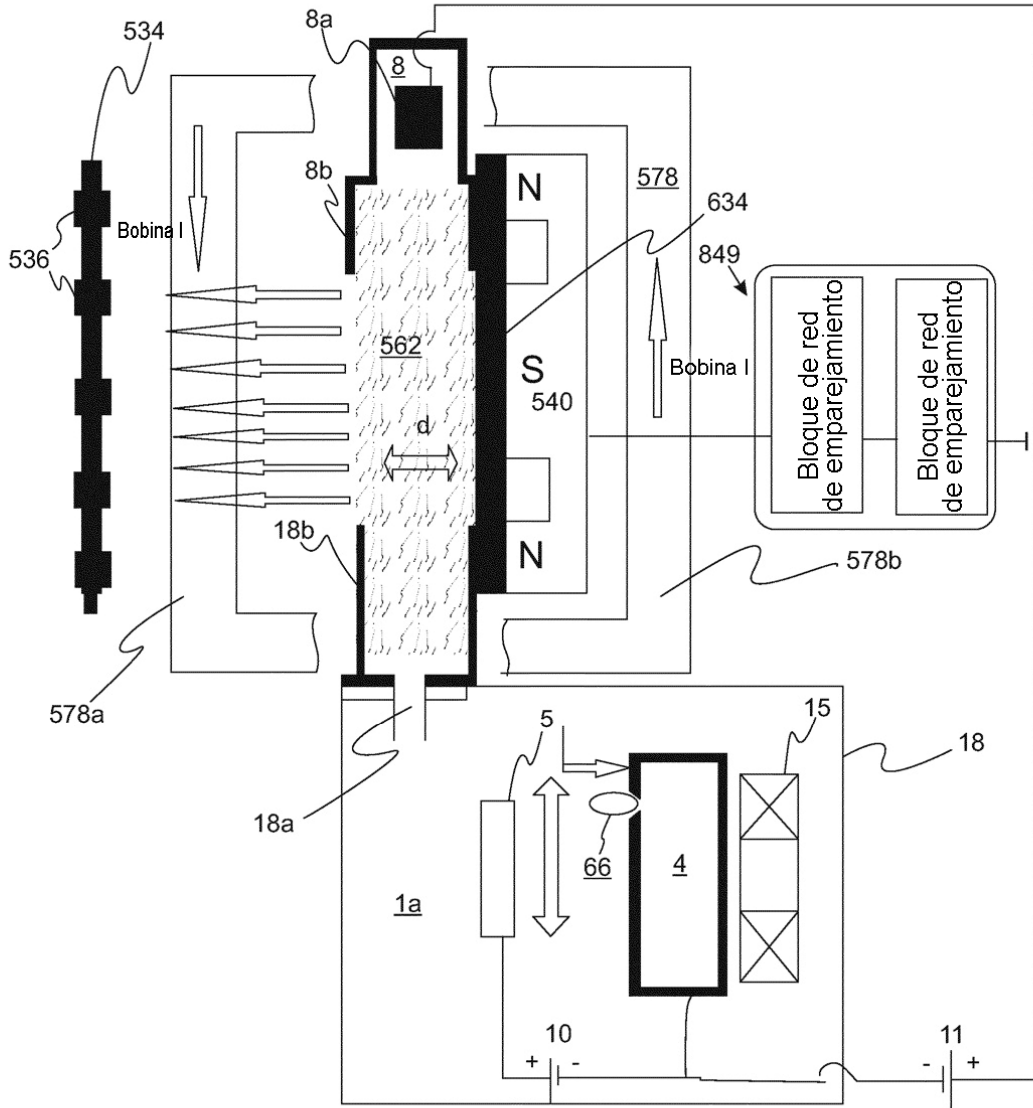


Fig. 22F

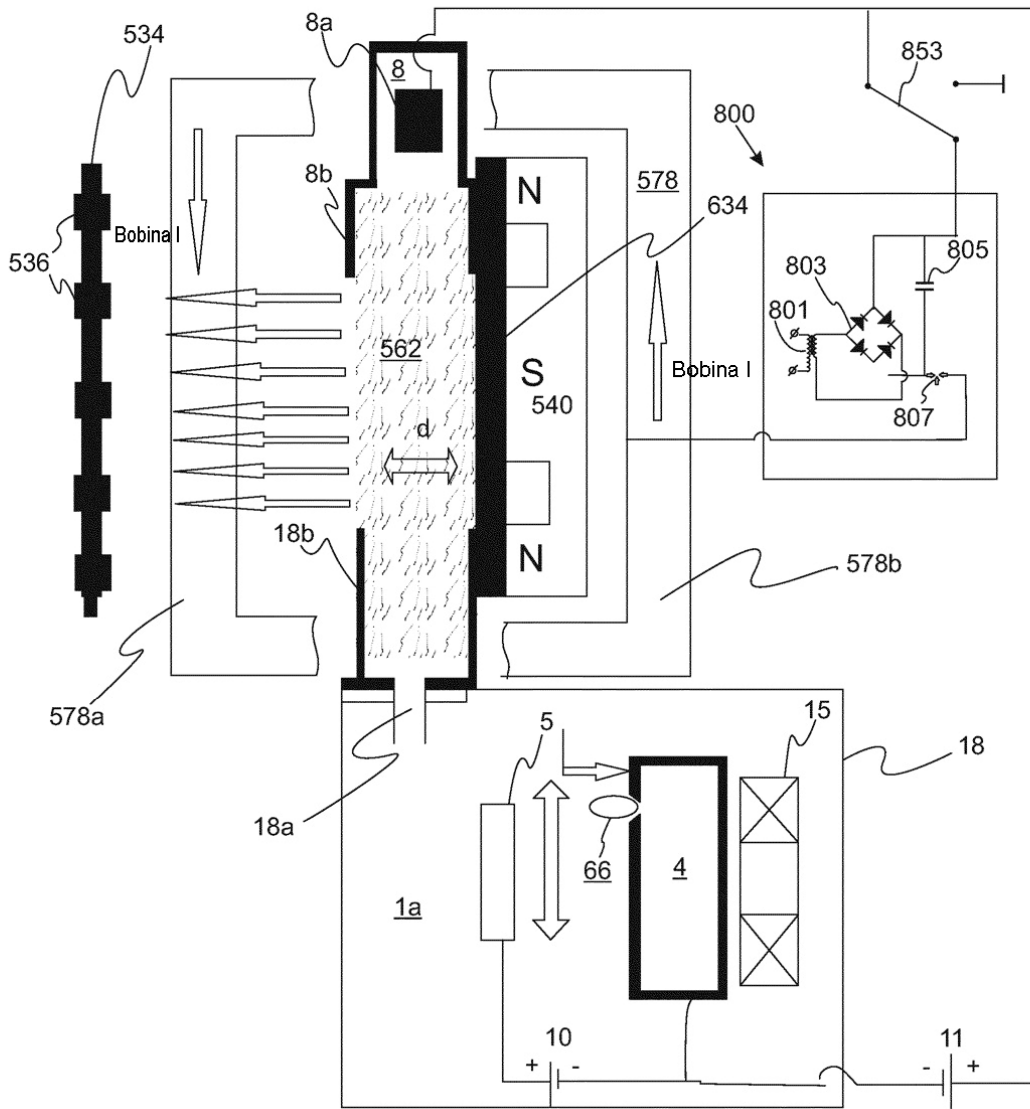


Fig. 22G

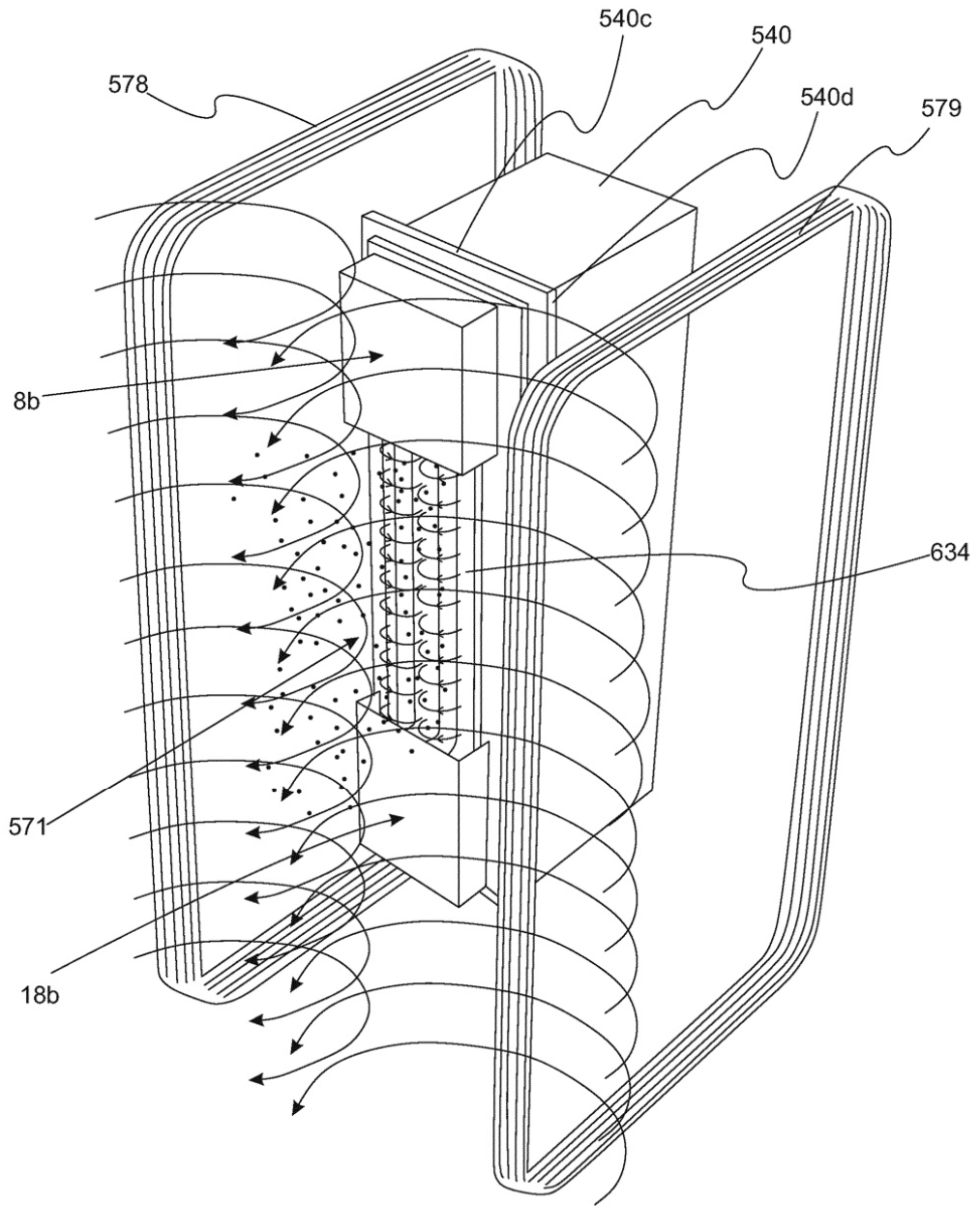


Fig. 23

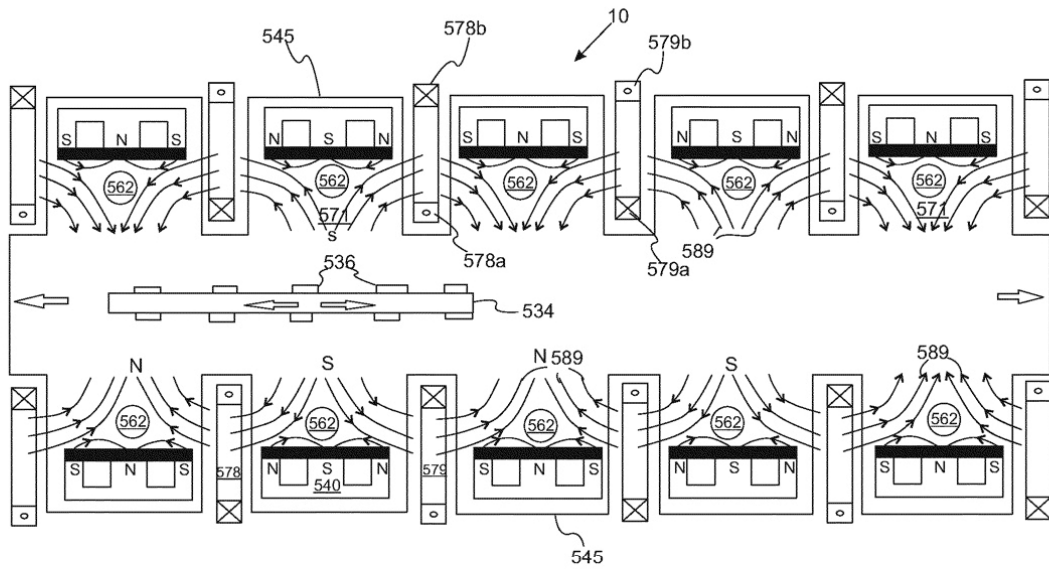


Fig. 24A

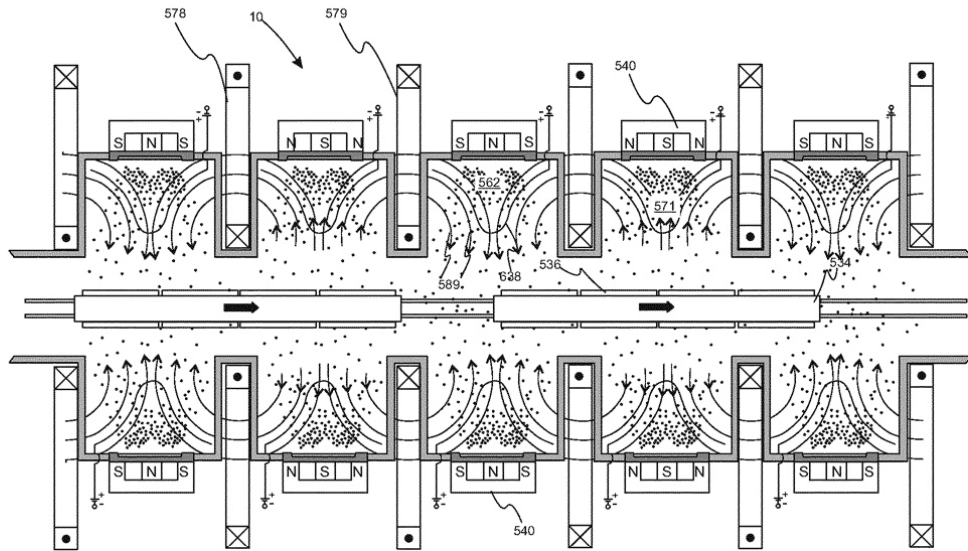


Fig. 24B

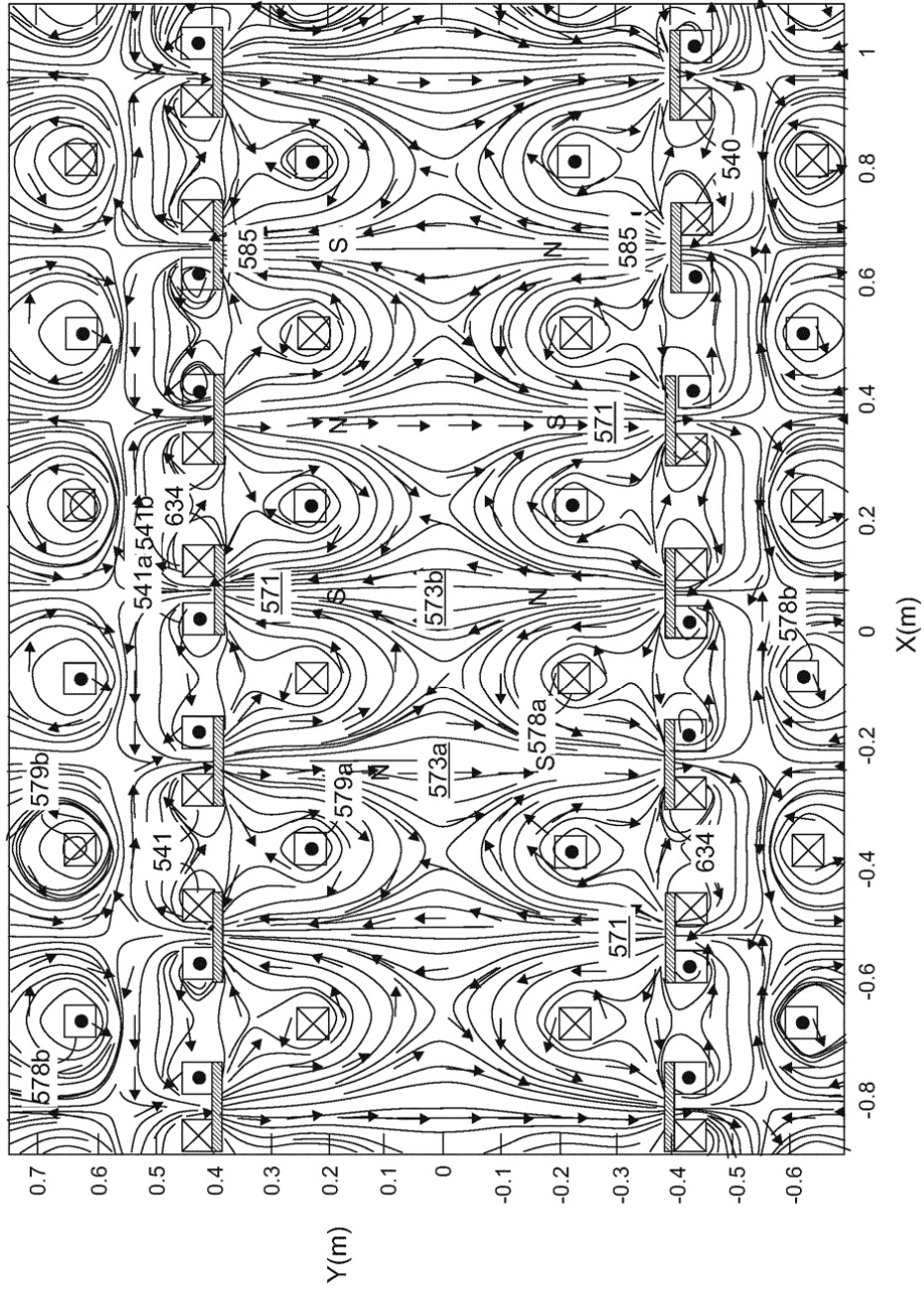


Fig. 24C

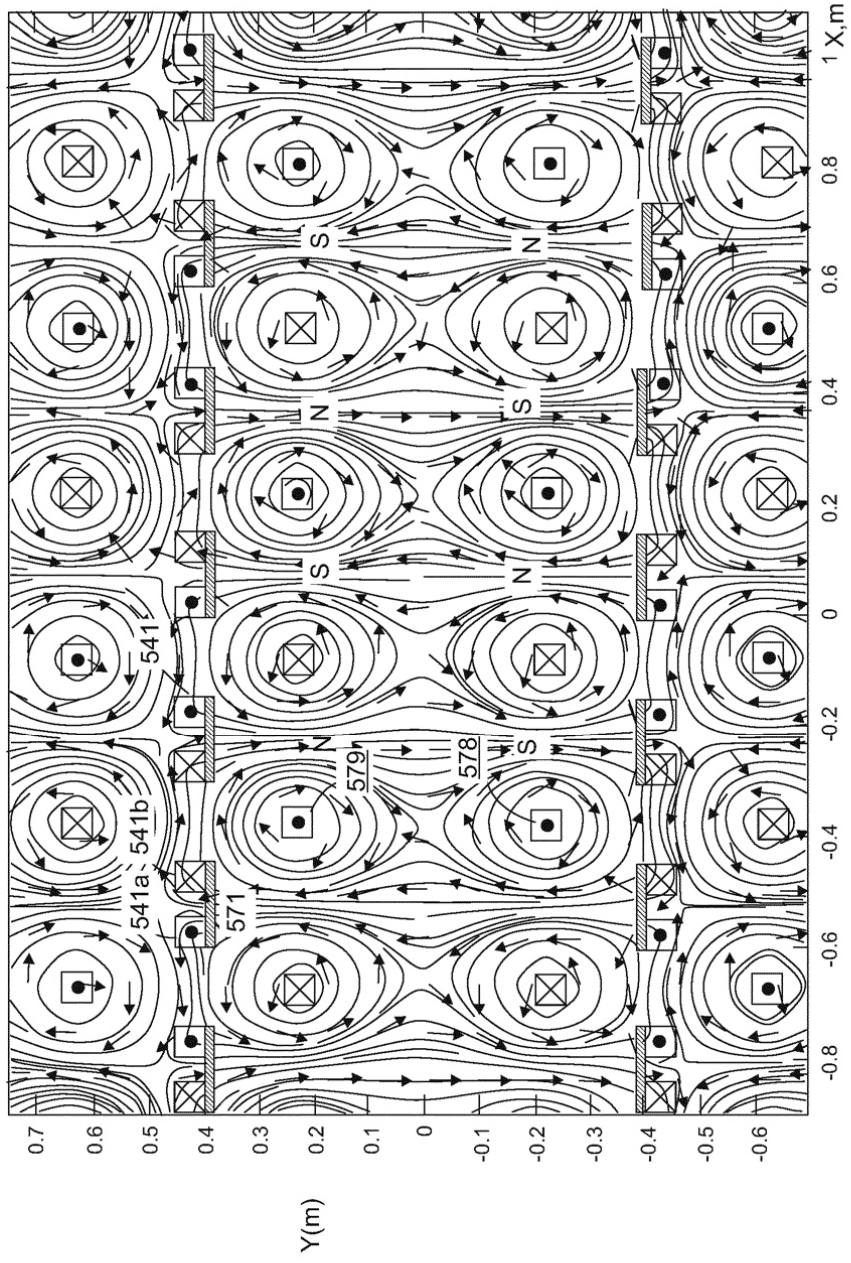


Fig. 24D

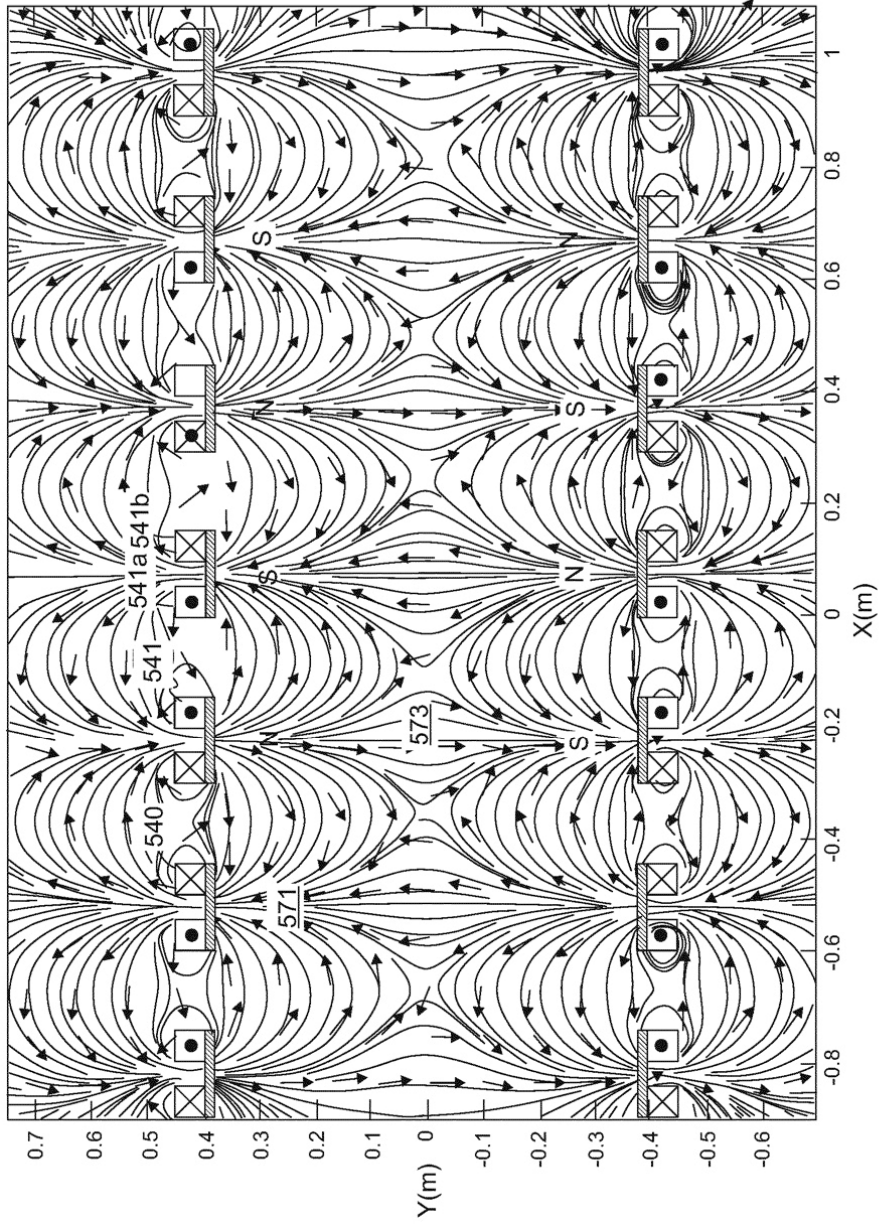


Fig. 24E

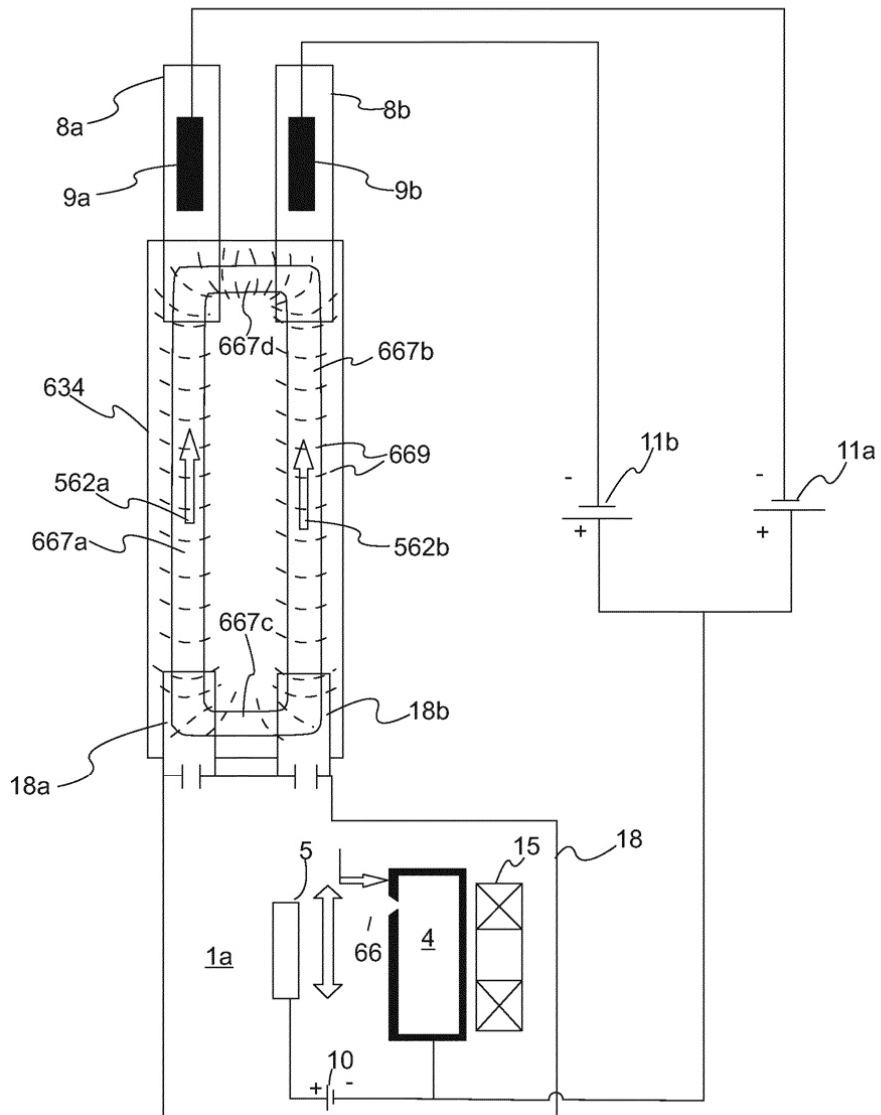


Fig. 25A

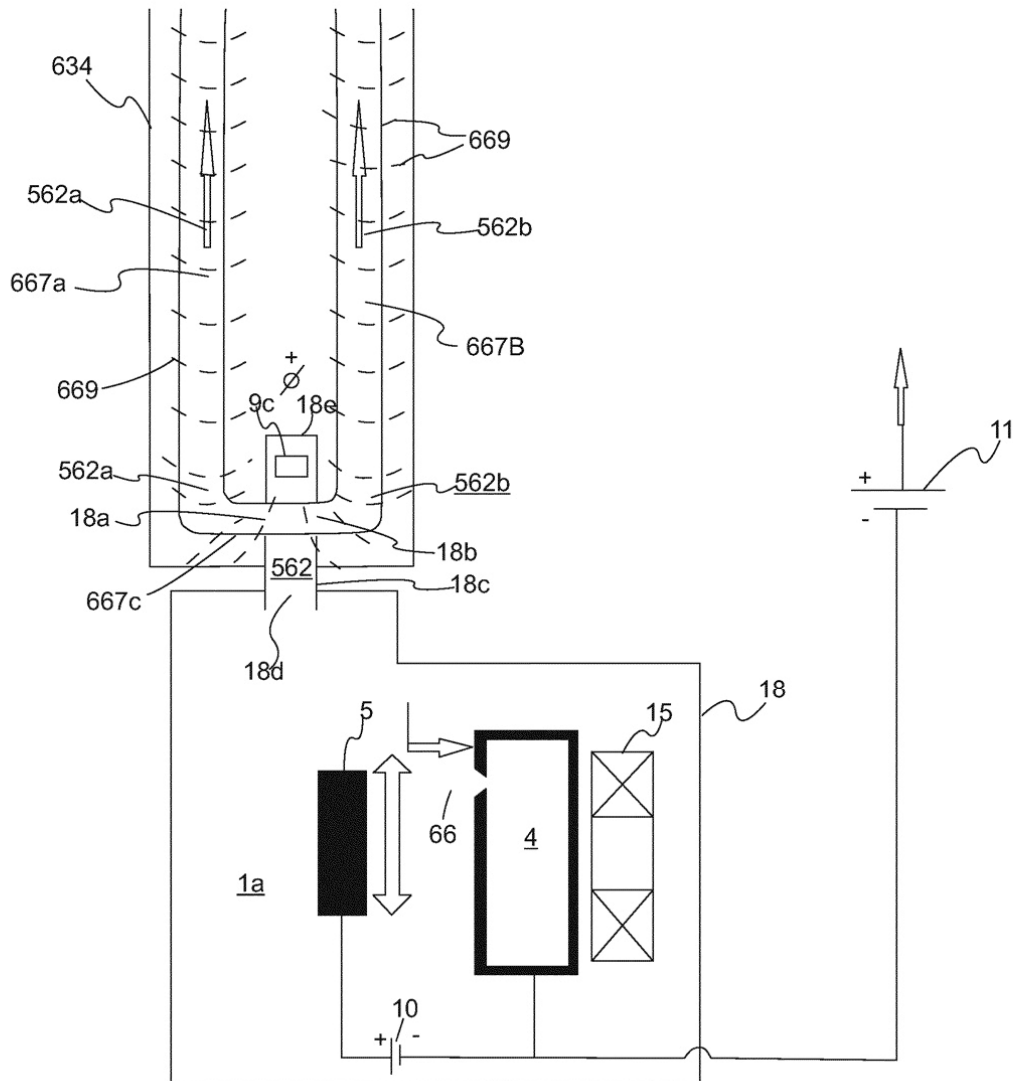


Fig. 25B

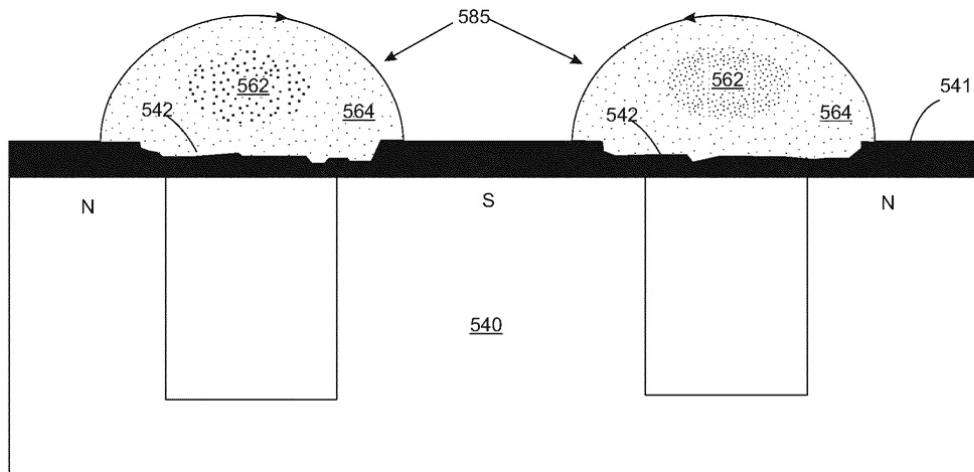


Fig. 25C

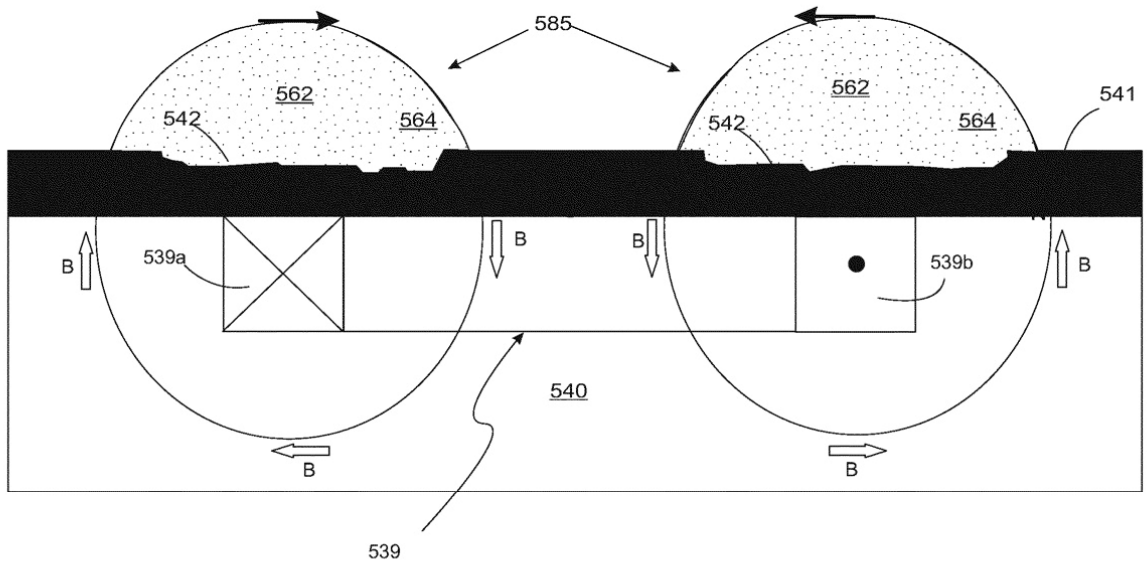


Fig. 25D

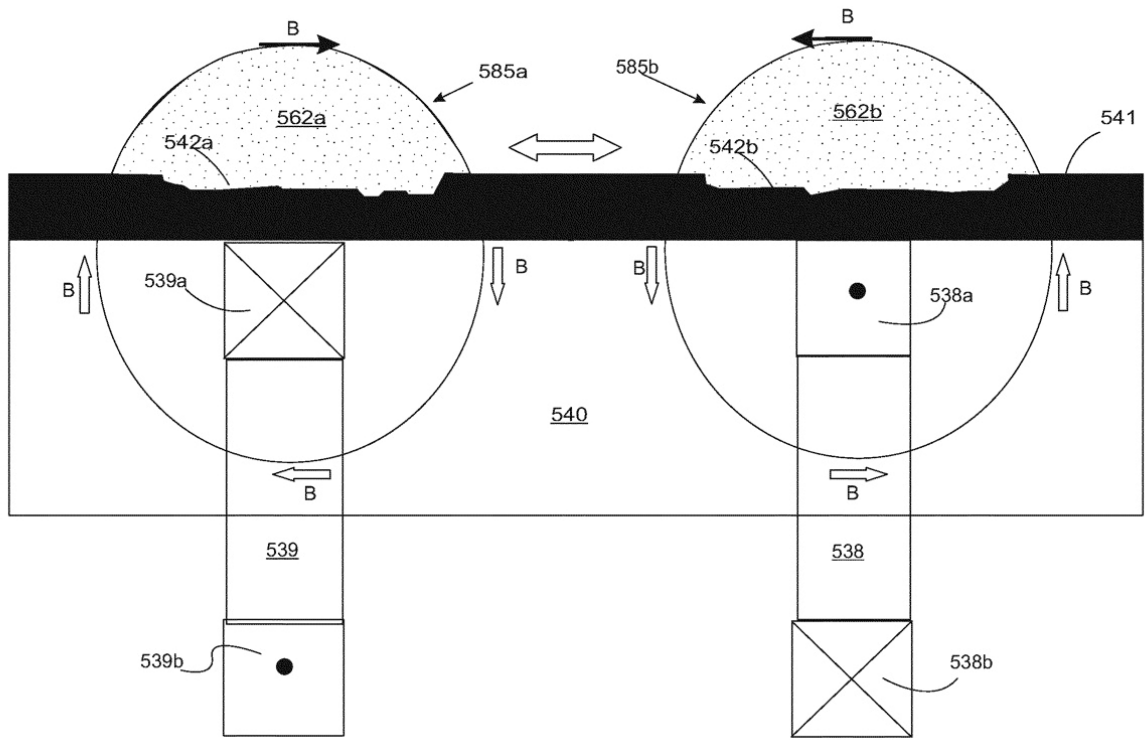


Fig. 25E

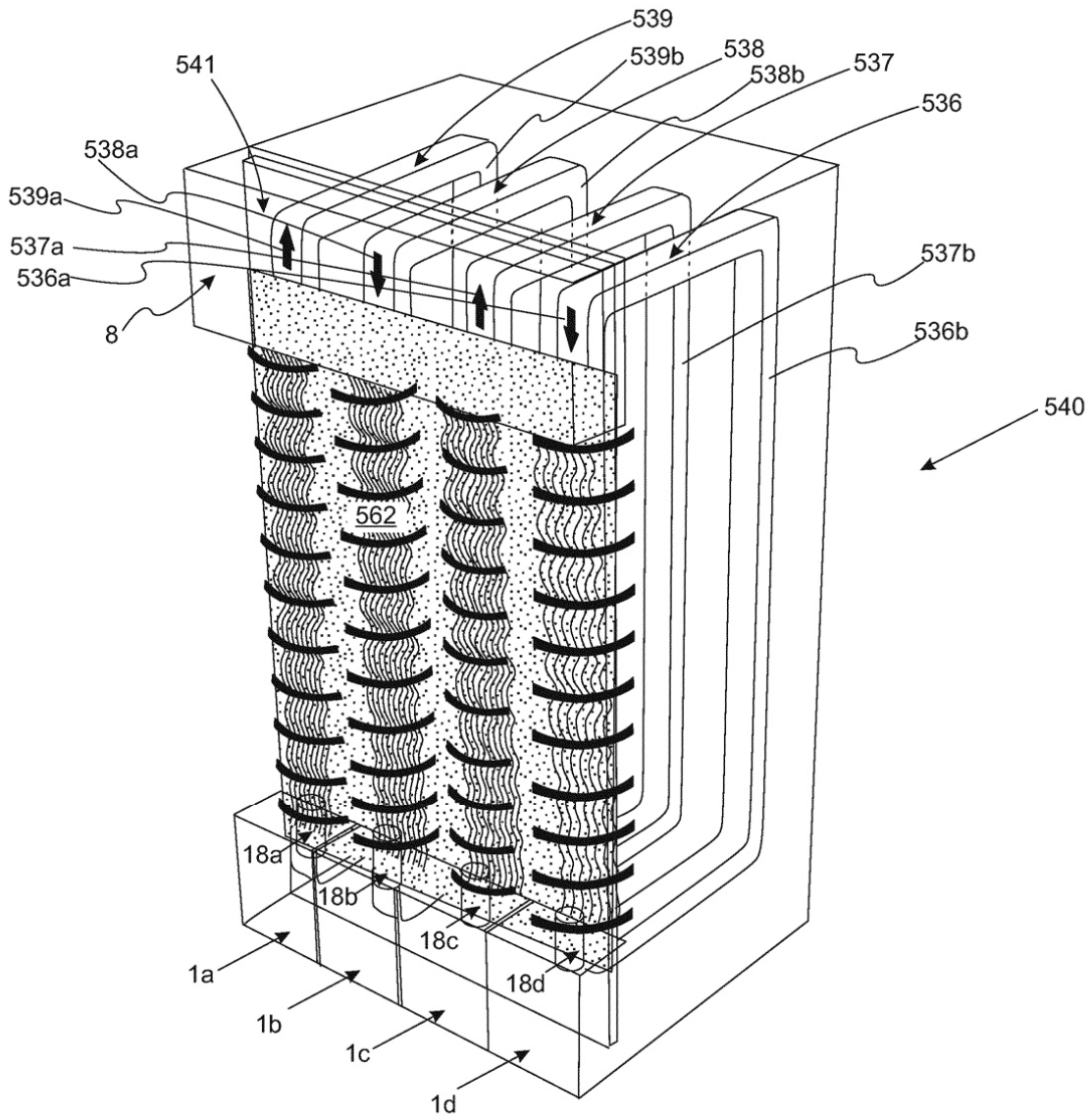


Fig. 25F

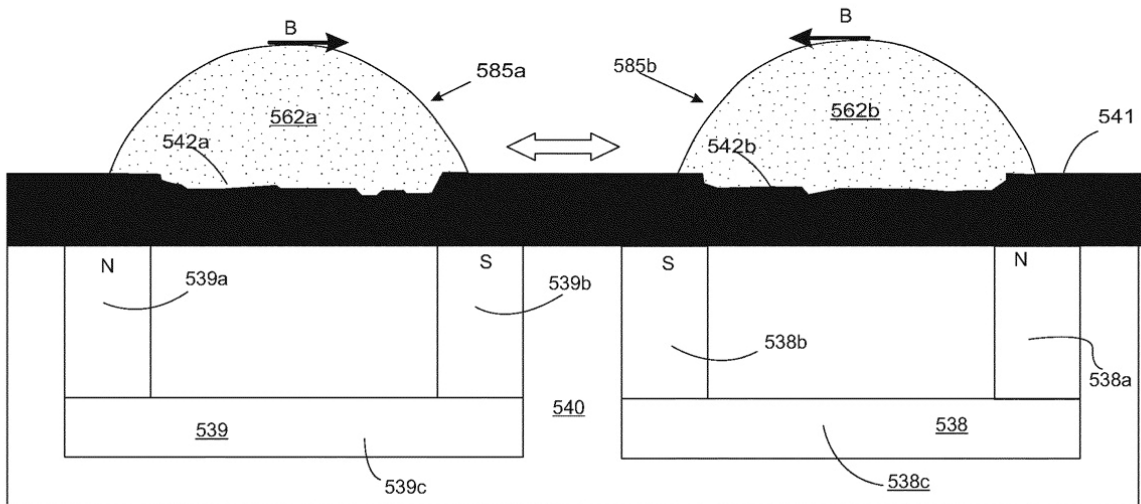


Fig. 25G

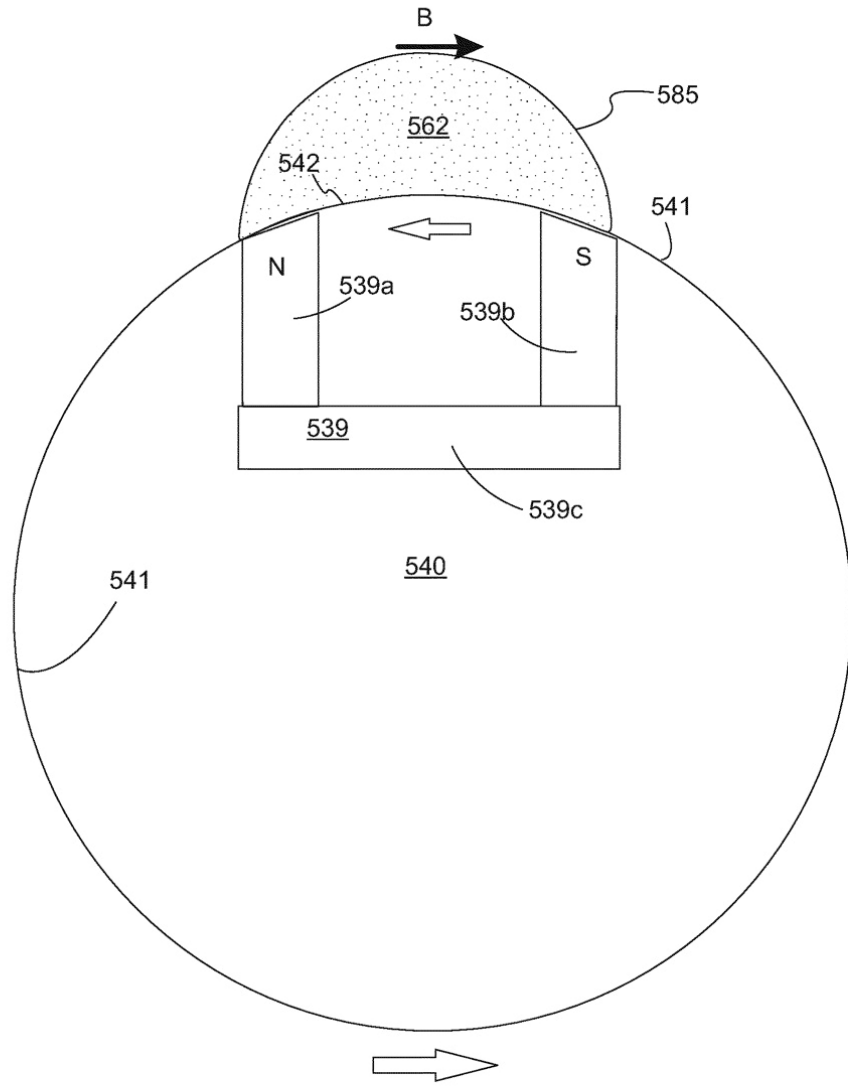


Fig. 25H

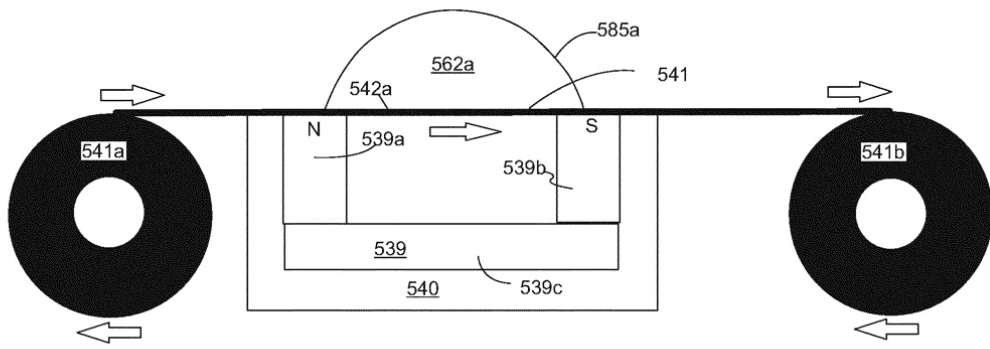


Fig. 25I

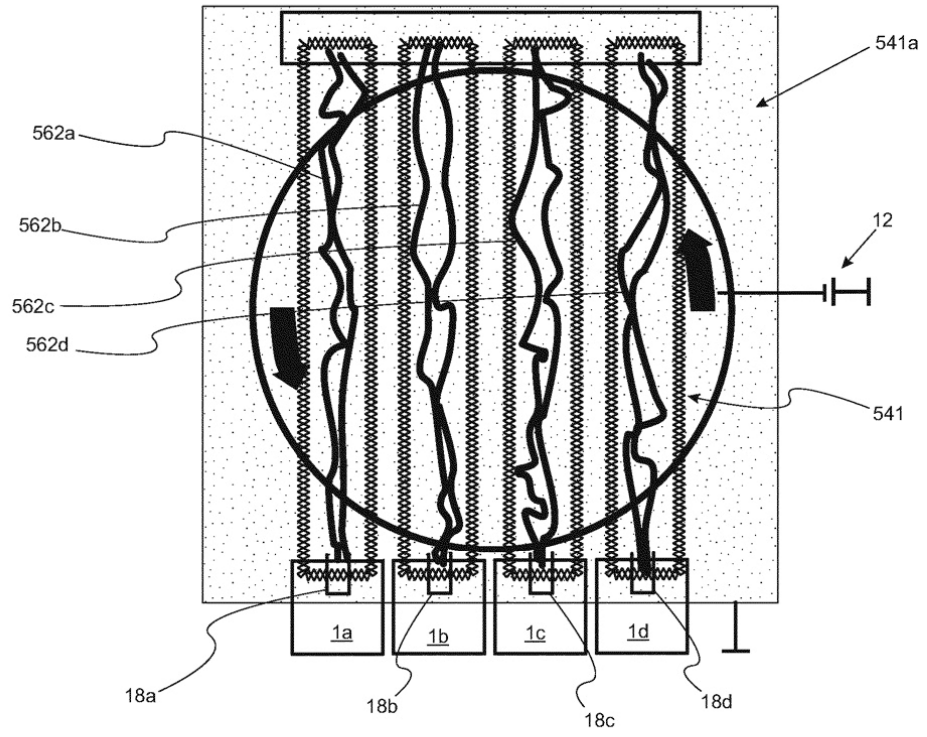


Fig. 25J

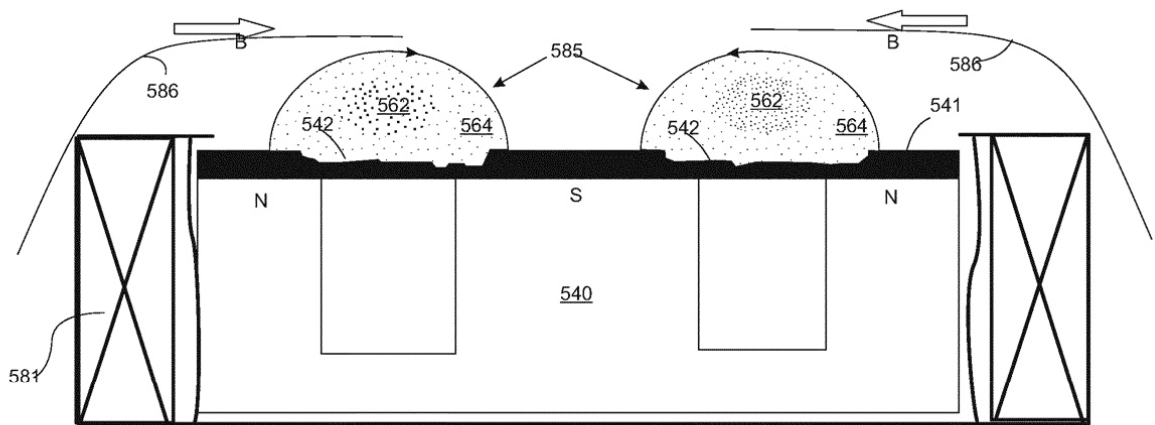


Fig. 25K

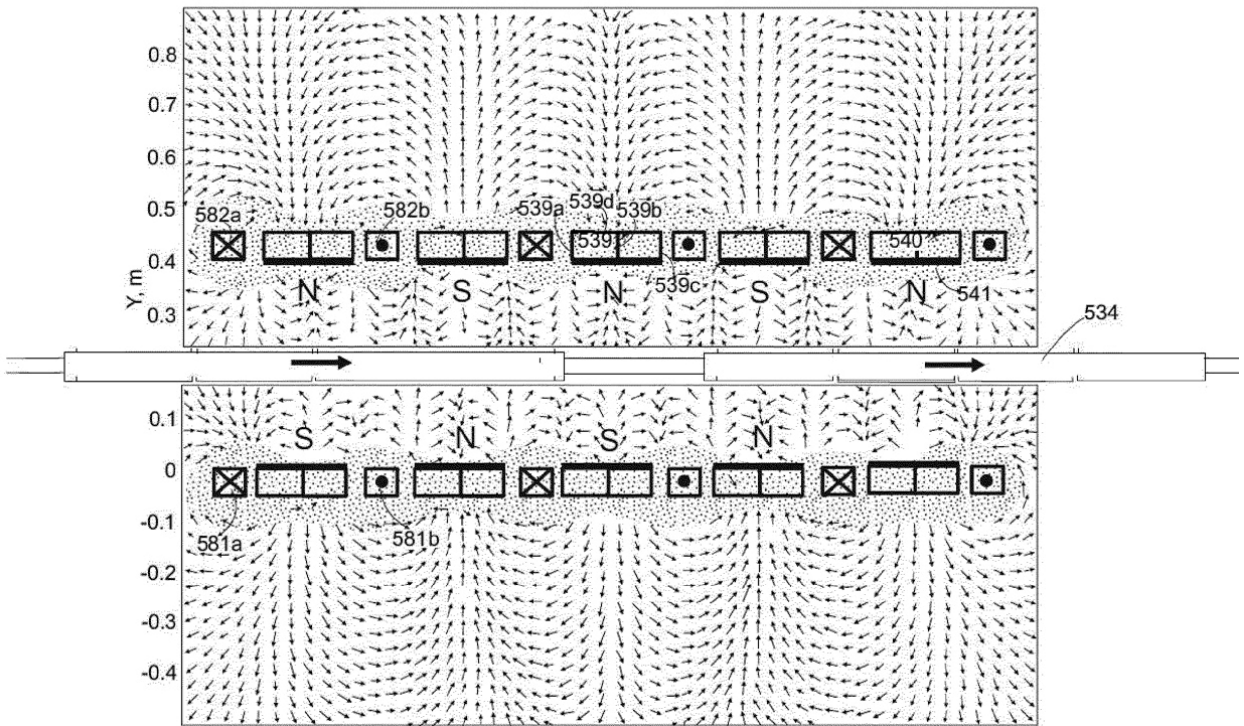


Fig. 25L

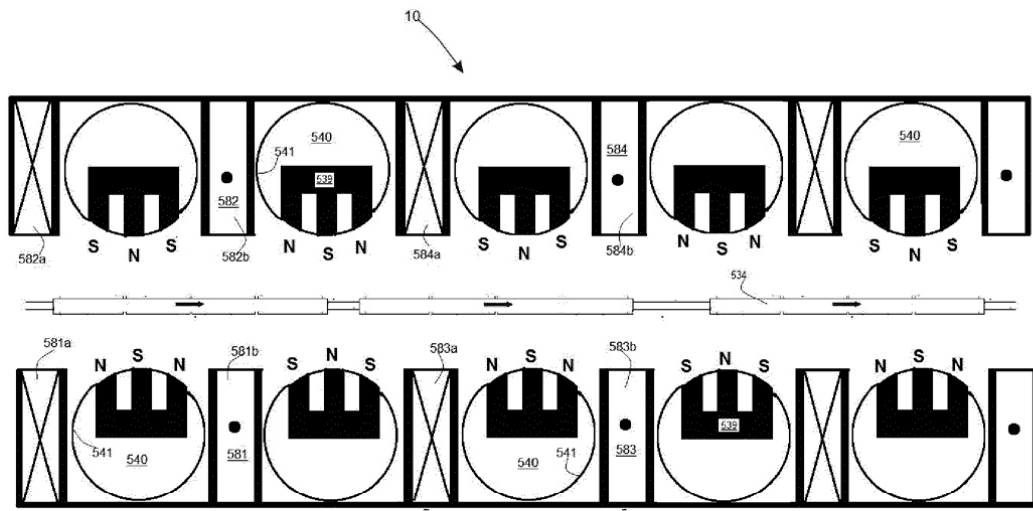


Fig. 25M

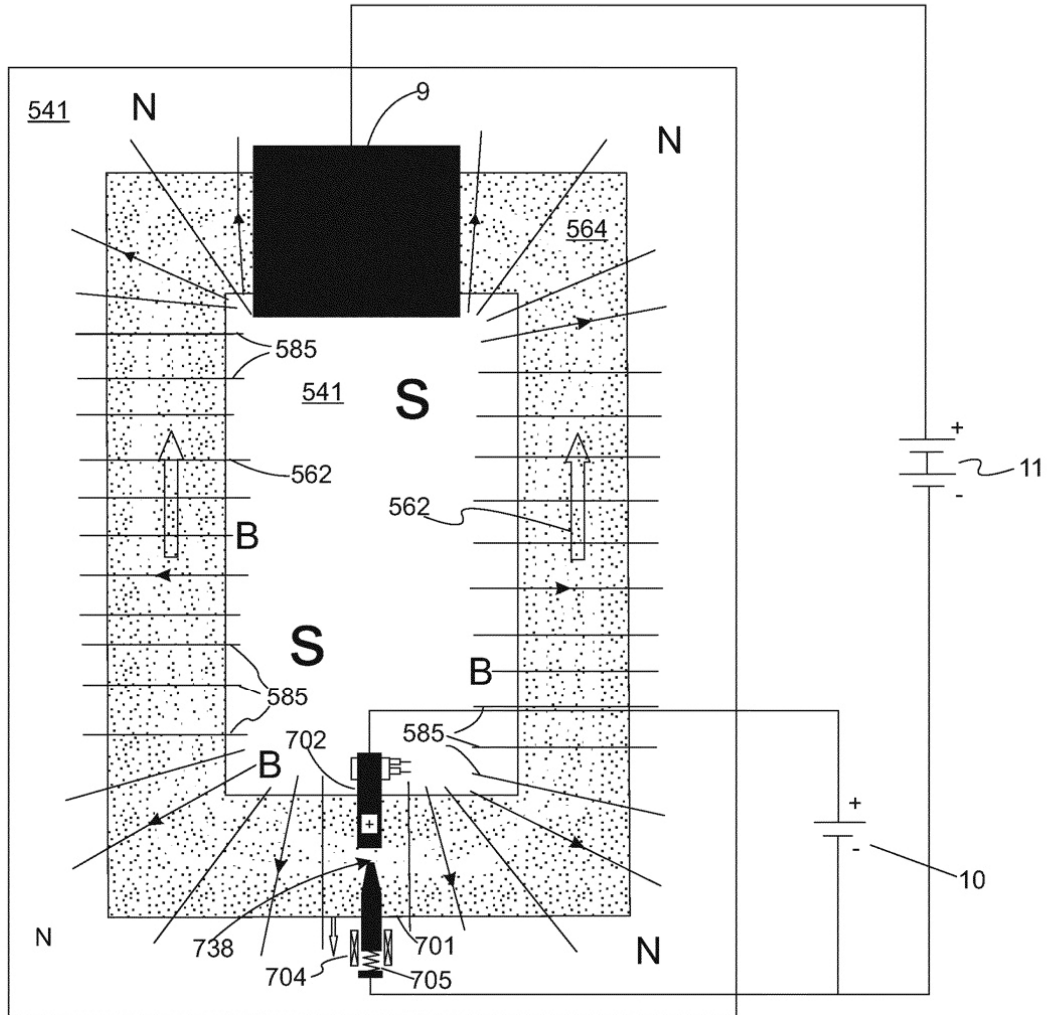


Fig. 26A

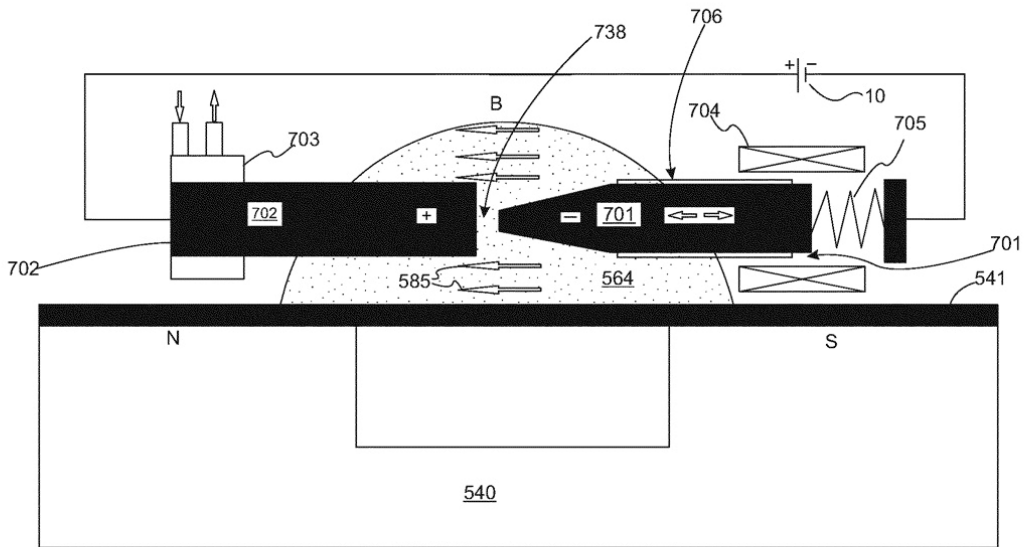


Fig. 26B

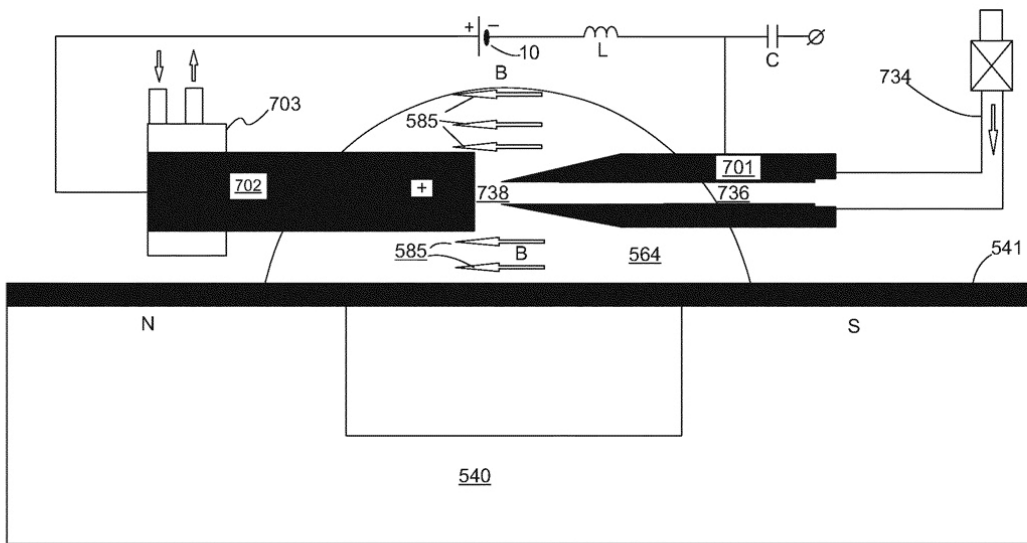


Fig. 26C

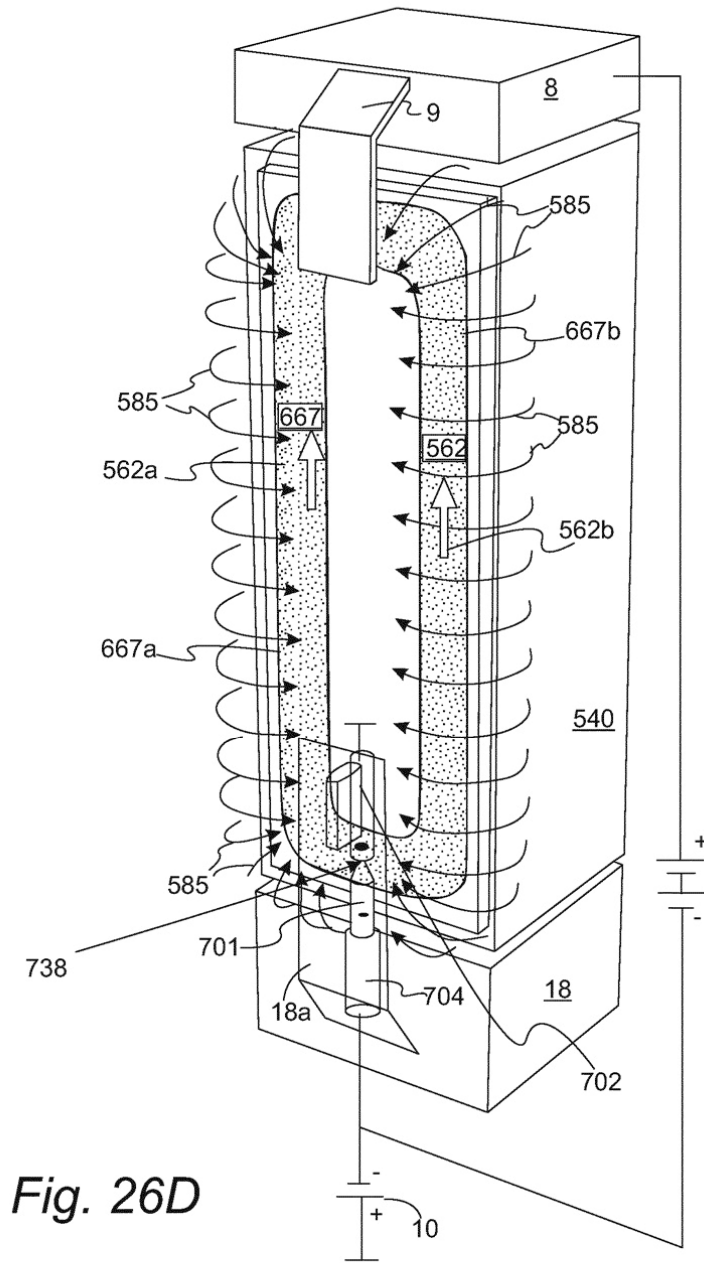


Fig. 26D

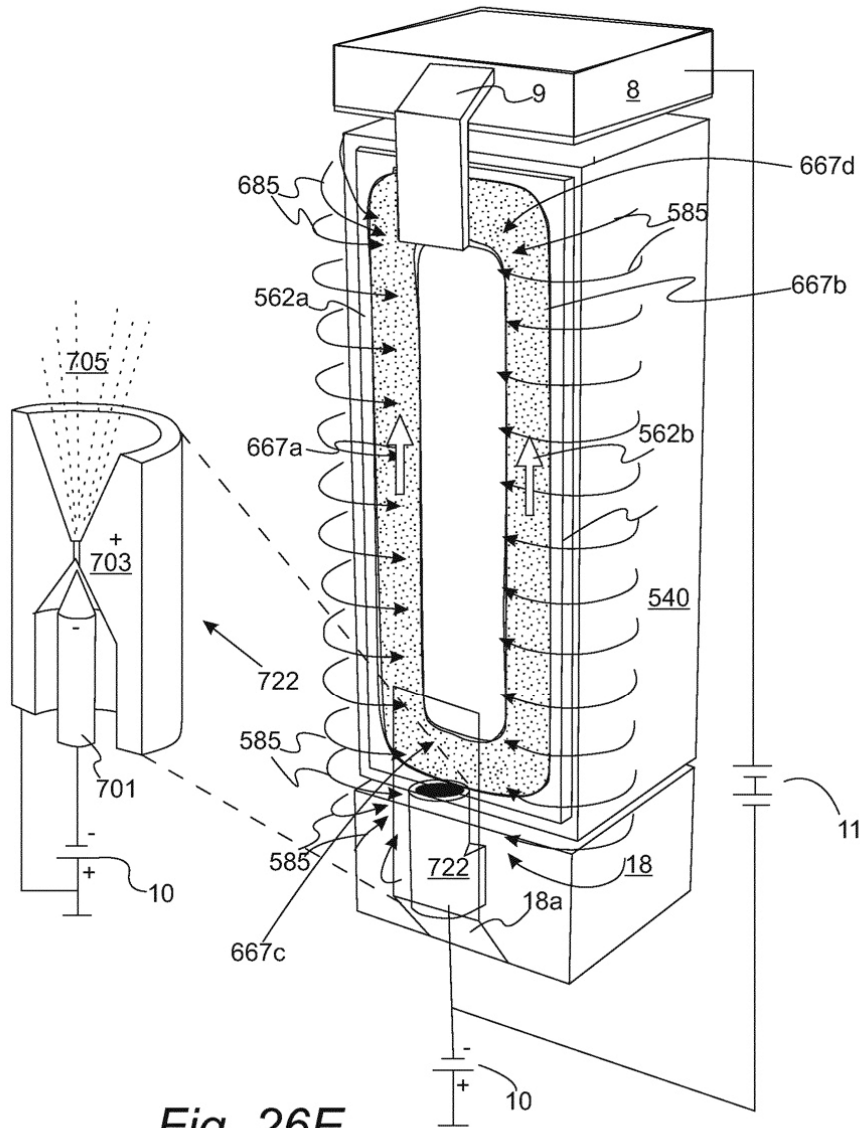


Fig. 26E

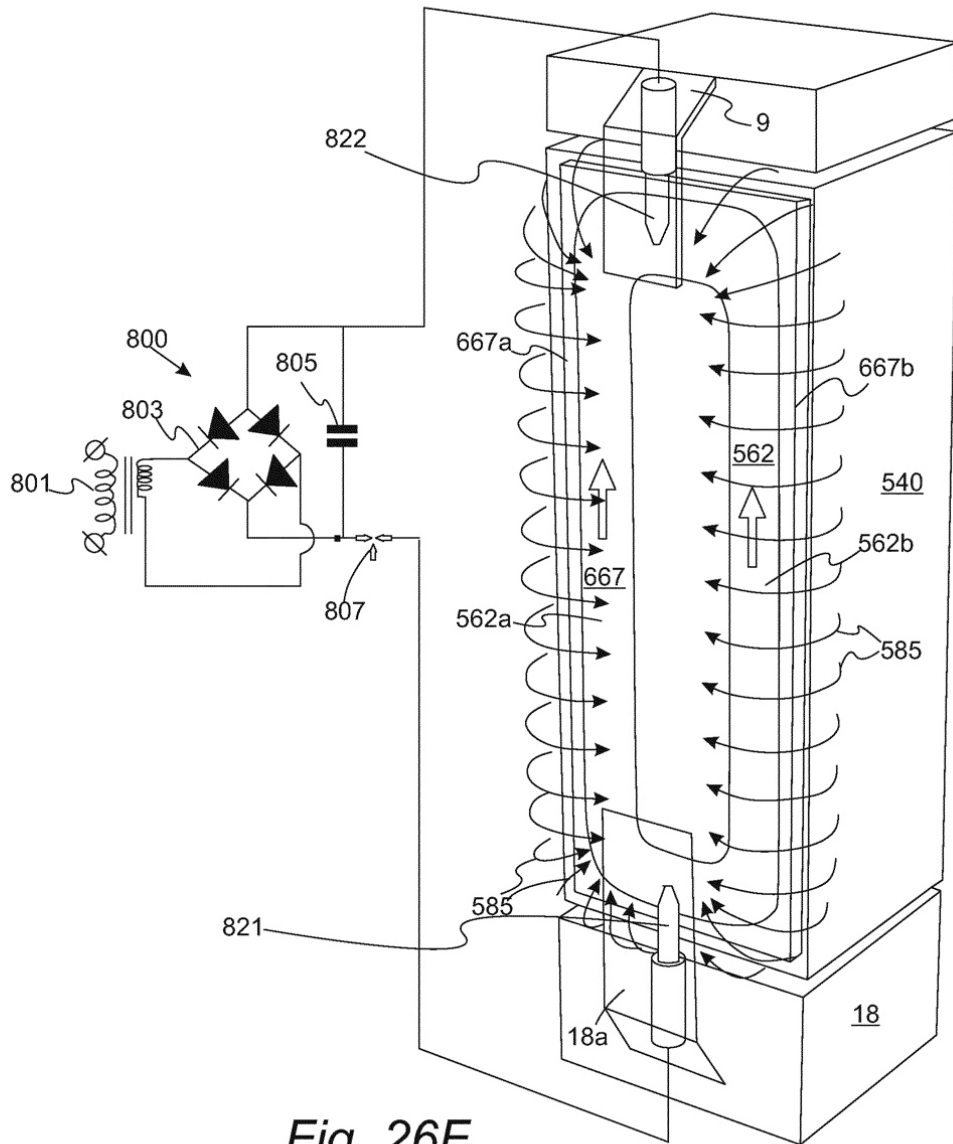


Fig. 26F

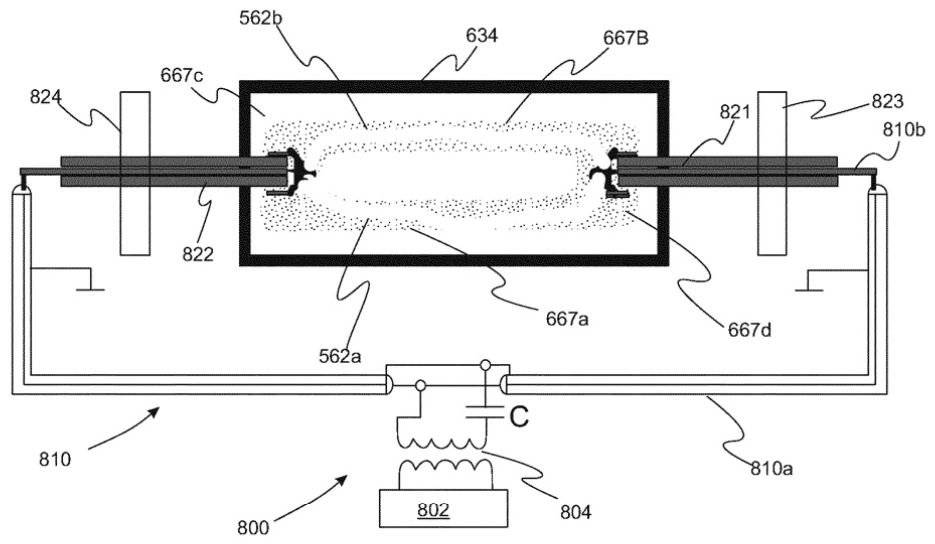


Fig. 26G

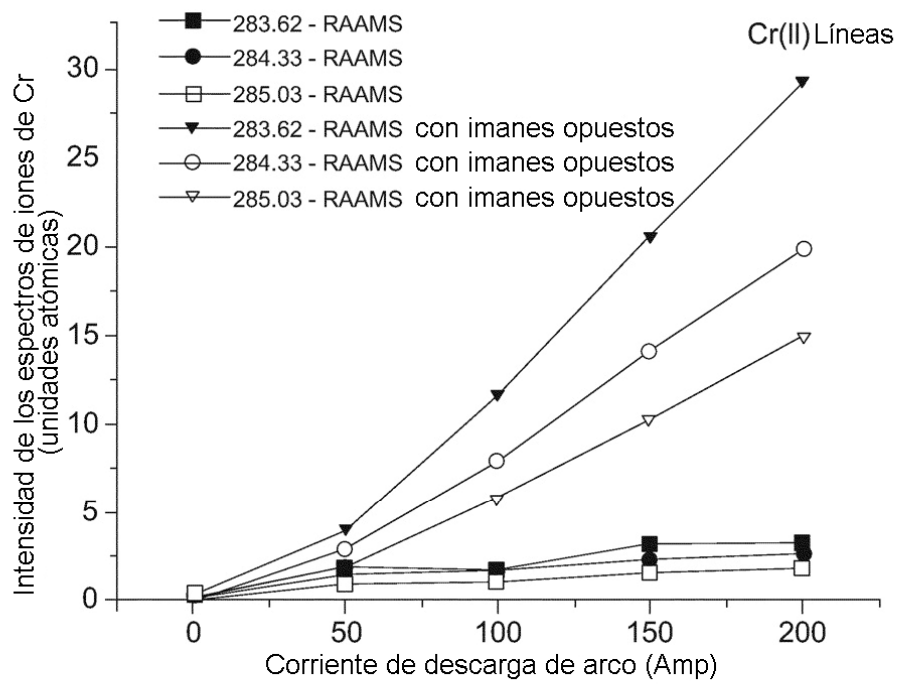


Fig. 27A

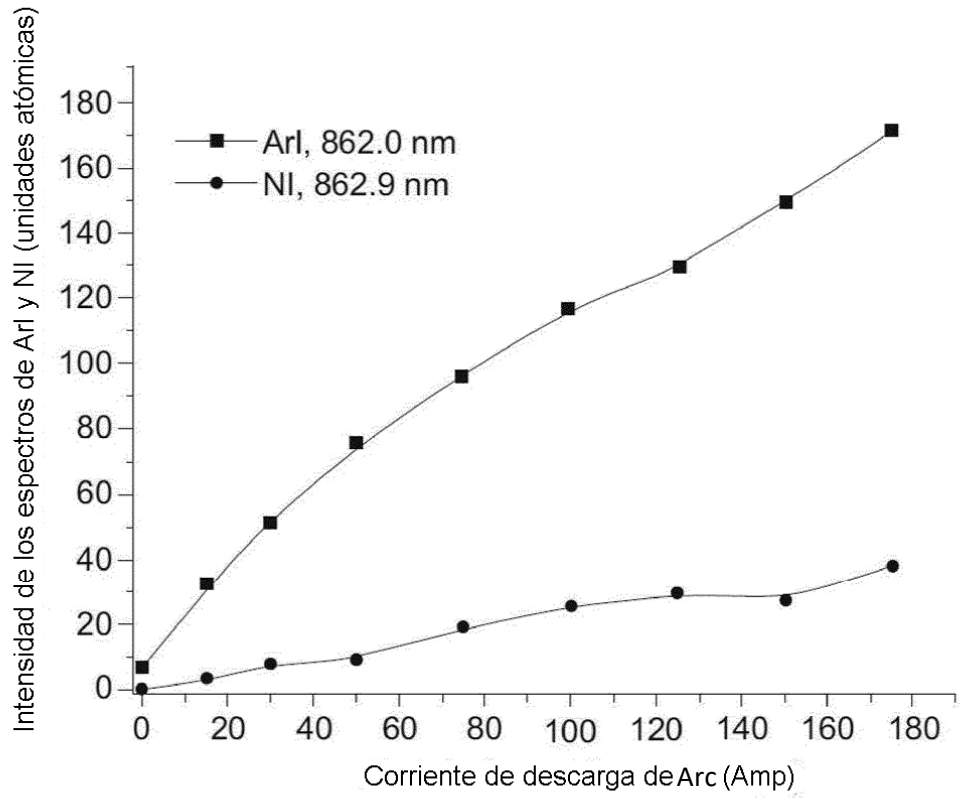


Fig. 27B

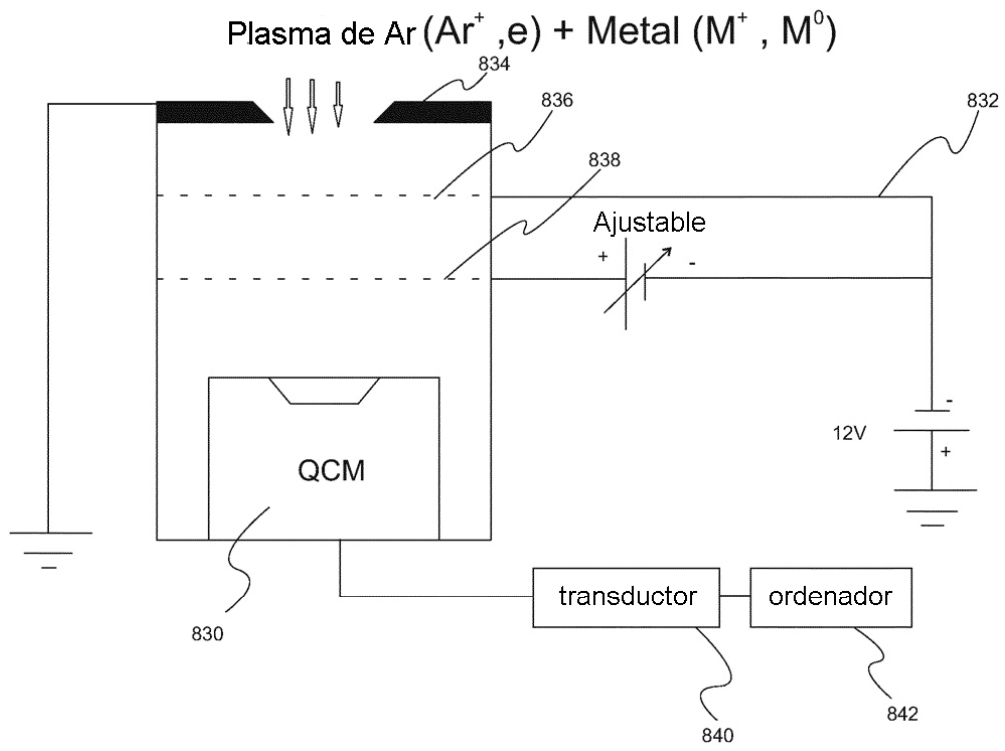


Fig. 28A

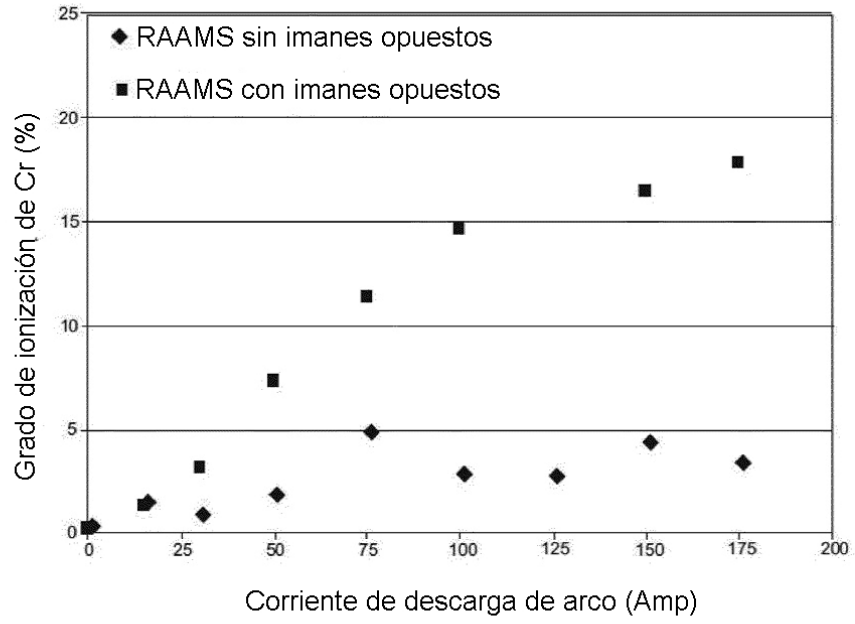


Fig. 28B

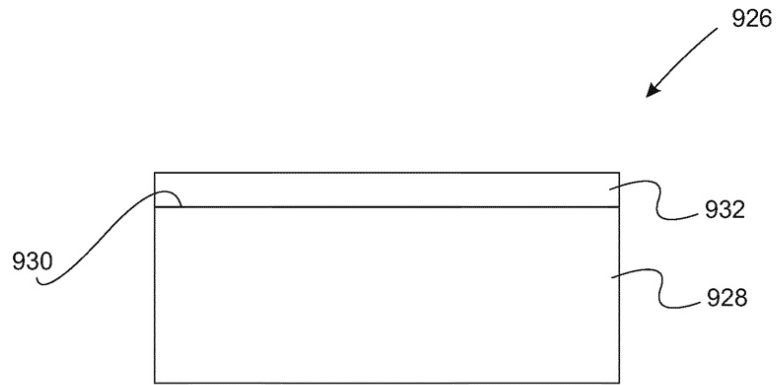


Fig. 29A

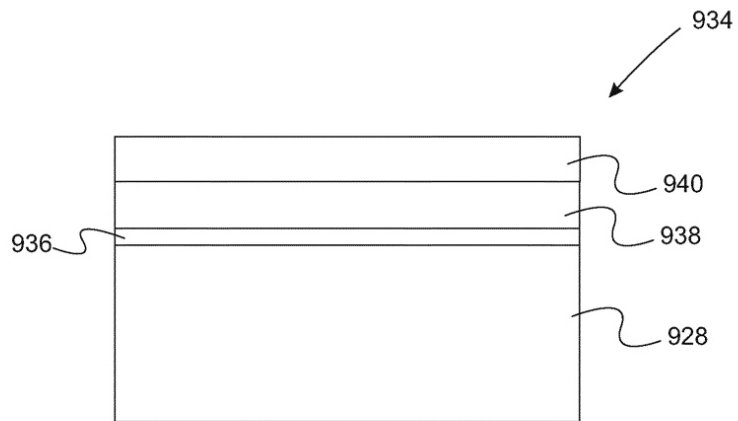


Fig. 29B