

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 979 255**

(51) Int. Cl.:

G21B 1/05 (2006.01)

G21B 1/11 (2006.01)

H05H 1/06 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.06.2018 PCT/US2018/036388**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **13.12.2018 WO18226914**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.06.2018 E 18813105 (6)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2024 EP 3635748**

(54) Título: **Sistema de confinamiento de plasma y métodos de uso**

(30) Prioridad:

07.06.2017 US 201762516508 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.09.2024

(73) Titular/es:

**UNIVERSITY OF WASHINGTON (50.0%)
4545 Roosevelt Way NE, Suite 400
Seattle, Washington 98105-4721, US y
LAWRENCE LIVERMORE
NATIONAL SECURITY, LLC (50.0%)**

(72) Inventor/es:

**SHUMLAK, URI;
MCLEAN, HARRY S. y
NELSON, BRIAN A.**

(74) Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 979 255 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 confinamiento de plasma y métodos de uso

Antecedentes

A menos que se indique lo contrario en el presente documento, los materiales descritos en esta sección no son técnica anterior a las reivindicaciones de esta solicitud y no se admiten como técnica anterior mediante su inclusión en esta sección.

La fusión nuclear es el proceso de combinar dos núcleos. Cuando dos núcleos de elementos con números atómicos menores que el del hierro se fusionan, se libera energía. La liberación de energía se debe a una ligera diferencia de masa entre los reactivos y los productos de la reacción de fusión y se rige por $\Delta E = \Delta mc^2$. La liberación de energía también depende de que la fuerza nuclear fuerte de atracción entre los núcleos reactivos supere la fuerza electrostática de repulsión entre los núcleos reactivos.

La reacción de fusión que requiere la temperatura del plasma más baja se produce entre el deuterio (un núcleo de hidrógeno con un protón y un neutrón) y el tritio (un núcleo de hidrógeno que tiene un protón y dos neutrones). Esta reacción produce un núcleo de helio-4 y un neutrón.

Un enfoque para lograr la fusión nuclear es energizar un gas que contiene reactivos de fusión dentro de la cámara de un reactor. El gas energizado se convierte en plasma a través de ionización. Para lograr condiciones con temperaturas y densidades suficientes para la fusión, es necesario confinar el plasma.

El documento US 2014/247913 A1 divulga sistemas y métodos para comprimir el plasma. U Shumlak et al, "Increasing plasma parameters using sheared flow stabilization of a Z-pinch", 25 enero 2017, DOI: 10.1063/1.4977468 se refiere al aumento de los parámetros del plasma mediante la estabilización del flujo cizallado de un tipo Z-pinch. U Shumlak et al, "High energy density Z-pinch plasmas using flow stabilization", AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, vol. 1639, enero 2014, páginas 76-79, ISSN: 0094-243X, DOI: 10.1063/1.4904781 se refiere a plasmas por pinzamiento en Z. Mclean Harry S. et al, "Development of a Compact Fusion Device based on the Flow Z-Pinch", 2016 ARPA-e Annual Review, 11 de agosto de 2015, páginas 1-36, se refiere al desarrollo de un dispositivo de fusión compacto basado en el tipo Z-pinch de flujo.

Resumen

De acuerdo con la invención, se proporcionan un sistema de confinamiento de plasma de acuerdo con la reivindicación 1 y un método para operar un sistema de confinamiento de plasma de acuerdo con la reivindicación 12. Una realización útil para comprender la invención se refiere a un sistema de confinamiento de plasma que incluye un electrodo interno que tiene un primer extremo redondeado que está dispuesto sobre un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo interno. El electrodo externo incluye una cubierta conductora sólida y un material eléctricamente conductor dispuesto sobre la cubierta conductora sólida y sobre el eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 170 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión.

Una realización adicional útil para comprender la invención se refiere a un método para operar un sistema de confinamiento de plasma. El sistema de confinamiento de plasma incluye un electrodo interno que tiene un primer extremo redondeado que está dispuesto sobre un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo interno. El método incluye hacer fluir gas en el sistema de confinamiento de plasma y aplicar, a través de una fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo externo, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas en un plasma por pinzamiento en Z que fluye entre (i) un material eléctricamente conductor dispuesto sobre una cubierta conductora sólida del electrodo externo y sobre el eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma y (ii) el primer extremo redondeado del electrodo interno. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 170 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión. El método también incluye mover una primera porción líquida del material eléctricamente conductor fuera del sistema de confinamiento de plasma. La primera porción líquida del material eléctricamente conductor se calienta a través de productos de reacción del plasma tipo Z-pinch.

Otra realización útil para comprender la invención se refiere a un sistema de confinamiento de plasma que incluye un electrodo interno, un electrodo intermedio que rodea al menos parcialmente el electrodo interno, y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo intermedio. El electrodo externo incluye una cubierta conductora sólida y un material eléctricamente conductor dispuesto sobre la cubierta conductora sólida. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión.

Otra realización adicional útil para comprender la invención se refiere a un método para operar un sistema de confinamiento de plasma. El sistema de confinamiento de plasma incluye un electrodo interno, un electrodo intermedio que rodea al menos parcialmente el electrodo interno, y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo intermedio. El método incluye hacer fluir gas en una región de aceleración entre el electrodo interno y el electrodo intermedio y aplicar, a través de una primera fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y

el electrodo intermedio, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas en un plasma que tiene una sección transversal sustancialmente anular, el plasma fluye axialmente dentro de la región de aceleración hacia un primer extremo del electrodo interno y un primer extremo del electrodo externo. El método también incluye aplicar, a través de una segunda fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo externo para establecer un plasma por pinzamiento en Z que fluye entre (i) un material eléctricamente conductor dispuesto sobre una cubierta conductora sólida del electrodo externo y (ii) el primer extremo del electrodo interno. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión. El método también incluye mover una primera porción líquida del material eléctricamente conductor fuera del sistema de confinamiento de plasma. La primera porción líquida del material eléctricamente conductor se calienta a través de productos de reacción del plasma tipo Z-pinch.

Cuando el término "sustancialmente" o "aproximadamente" se utiliza en el presente documento, significa que no es necesario alcanzar exactamente la característica, parámetro, o valor citado, sino que las desviaciones o variaciones, que incluyen por ejemplo, tolerancias, errores de medición, Las limitaciones de precisión de la medición y otros factores conocidos por los expertos en la técnica, pueden ocurrir en cantidades que no excluyen el efecto que la característica pretendía proporcionar. En algunos ejemplos divulgados en el presente documento, "sustancialmente" o "aproximadamente" significa dentro de +/- 5 % del valor indicado.

Estos, así como otros aspectos, ventajas, y alternativas resultarán evidentes para los expertos con conocimientos básicos en la técnica al leer la siguiente descripción detallada, con referencia cuando corresponda a los dibujos acompañantes. Además, se debe entender que este resumen y otras descripciones y figuras proporcionadas en el presente documento pretenden ilustrar la invención sólo a modo de ejemplo y, como tal, que son posibles numerosas variaciones.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es un diagrama esquemático en sección transversal de un sistema de confinamiento de plasma, de acuerdo con una realización de ejemplo.

25 La Figura 2 es un diagrama esquemático en sección transversal de un sistema de confinamiento de plasma, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 3 es un diagrama de bloques de un método para operar un sistema de confinamiento de plasma, de acuerdo con una realización de ejemplo.

30 La Figura 4 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 5 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 6 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

35 La Figura 7 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 8 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

40 La Figura 9 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 10 es un diagrama de bloques de un método para operar un sistema de confinamiento de plasma, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 11 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

45 La Figura 12 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 13 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

50 La Figura 14 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 15 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

La Figura 16 ilustra algunos aspectos de un sistema de confinamiento de plasma y un método de operación, de acuerdo con una realización de ejemplo.

5 Descripción detallada

En el presente documento se divultan varias realizaciones de sistemas de confinamiento de plasma y métodos para su uso. Las realizaciones divulgadas, en comparación con los sistemas y métodos existentes, pueden facilitar una mayor estabilidad del plasma, un flujo de plasma cizallado más robusto, radios de plasma por pinzamiento en Z más pequeños, campos magnéticos más altos y/o una temperatura del plasma más alta. Algunas de las realizaciones divulgadas exhiben también un control independiente de la aceleración y la compresión del plasma.

Una característica adicional de algunas de las realizaciones divulgadas incluye uno o más electrodos con un material de electrodo líquido dispuesto en los mismos (por ejemplo, dispuesto sobre un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma). El material líquido del electrodo puede absorber y transferir calor desde la descarga de plasma, proporcionar protección contra neutrones, generar tritio adicional, proporcionar bombeo de vacío adicional, y proporcionar un medio de recuperación de tritio. El uso del material de electrodo líquido puede ayudar a mitigar problemas tales como el daño de los electrodos (sólidos) causado por el calor de la descarga de plasma. El material líquido del electrodo también se puede hacer circular dentro de la cámara de vacío (por ejemplo, sobre una pared de vertedero) de tal manera que el material líquido del electrodo tenga un componente azimutal y/o axial en su flujo dentro de la cámara de vacío.

20 La Figura 1 es un diagrama esquemático en sección transversal de un sistema de confinamiento de plasma 100. El sistema de confinamiento de plasma 100 incluye un electrodo interno 102 que tiene un primer extremo redondeado 104 que está dispuesto sobre un eje longitudinal 106 (por ejemplo, un eje de simetría cilíndrica) del sistema de confinamiento de plasma 100. El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo interno 102. El electrodo externo incluye una cubierta conductora sólida 108 y un material eléctricamente conductor 110 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 108 y sobre el eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100. El material eléctricamente conductor 110 tiene un punto de fusión dentro de un rango de 170 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión. En varios ejemplos, el material eléctricamente conductor 110 puede tomar la forma de eutécticos, aleaciones, o mezclas de uno o más de litio, plomo, o estaño.

30 El electrodo interno 102 generalmente toma la forma de una cubierta eléctricamente conductora (por ejemplo, formada por uno o más de acero inoxidable, molibdeno, tungsteno, o cobre) que tiene un cuerpo sustancialmente cilíndrico. El electrodo interno 102 incluye un primer extremo 104 (por ejemplo, un extremo redondeado) y un segundo extremo opuesto 126 (por ejemplo, un extremo sustancialmente en forma de disco). El primer extremo 104 se podría formar de un material a base de carbono tal como grafito o fibra de carbono, o uno o más de acero inoxidable, molibdeno, tungsteno, o cobre, por ejemplo. En algunas realizaciones, el electrodo interno 102 tiene un revestimiento sobre su superficie externa que incluye un material eléctricamente conductor que tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión. En varios ejemplos, el material eléctricamente conductor puede tomar la forma de eutécticos, aleaciones, o mezclas de uno o más de litio, plomo, o estaño. Alternativamente, el material eléctricamente conductor puede tomar la forma de litio elemental, plomo, o estaño.

40 El sistema de confinamiento de plasma 100 incluye además un mecanismo de alimentación 112 (por ejemplo, un sistema electromecánico) que está configurado para mover el electrodo interno 102 dentro o fuera del sistema de confinamiento de plasma 100 a lo largo del eje longitudinal 106. Durante la operación, el electrodo 102 se puede erosionar por la descarga de plasma y el mecanismo de alimentación 112 se puede operar para alimentar el electrodo interno 102 para mantener el espacio relativo entre el electrodo interno 102 y otros componentes del sistema de confinamiento de plasma 100.

45 El sistema de confinamiento de plasma 100 incluye además un sistema de enfriamiento 114 (por ejemplo, un intercambiador de calor) que está configurado para enfriar el electrodo interno 102 durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 100.

50 El electrodo externo generalmente toma la forma de una cubierta eléctricamente conductora (por ejemplo, de acero inoxidable) que tiene un cuerpo sustancialmente cilíndrico. La cubierta conductora sólida 108 del electrodo externo incluye una cubierta externa conductora sólida 132 y una cubierta interna sólida 134 (por ejemplo, formada de material eléctricamente conductor o material de alta resistividad tal como carburo de silicio) que está dispuesta dentro de la cubierta externa conductora sólida 132 y en contacto con la cubierta externa conductora sólida 132. Más específicamente, la cubierta interna sólida 134 incluye una pared axial 136 que rodea al menos parcialmente el eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100 (por ejemplo, rodea parcialmente el electrodo interno 102) y una pared radial 138 que acopla la pared axial 136 a la cubierta externa conductora sólida 132.

El electrodo externo incluye un primer extremo 120 y un segundo extremo opuesto 122. El primer extremo redondeado 104 del electrodo interno 102 está entre el primer extremo 120 (por ejemplo, un extremo sustancialmente en forma de disco) del electrodo externo y el segundo extremo 122 (por ejemplo, un extremo sustancialmente anular) del electrodo externo. La pared radial 138 y un primer extremo 120 del electrodo externo forman una región de acumulación 140 dentro de la cámara de confinamiento de plasma 100. La región de acumulación 140 sirve como depósito para una cantidad sustancial del material eléctricamente conductor 110 (por ejemplo, líquido) que está en la cámara de confinamiento de plasma 100. Como se muestra, el material eléctricamente conductor 110 también se puede hacer circular sobre el extremo 148 de la pared axial 136 mediante una bomba 150 y/o una bomba 156 como se discute con más detalle a continuación.

10 El electrodo externo (es decir, la cubierta conductora sólida 108 y el material eléctricamente conductor 110) rodea gran parte del electrodo interno 102. El electrodo interno 102 y el electrodo externo pueden ser concéntricos y tener simetría radial con respecto al eje longitudinal 106.

15 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye un intercambiador de calor 142, un primer puerto 144 configurado para guiar el material eléctricamente conductor 110 desde el intercambiador de calor 142 en la región de acumulación 140, y un segundo puerto 146 configurado para guiar el material eléctricamente conductor 110 desde la región de acumulación 140 hasta el intercambiador de calor 142. El intercambiador de calor 142 está configurado para recibir, a través del segundo puerto 146, el material eléctricamente conductor 110 que se calienta dentro del sistema de confinamiento de plasma 100, extraer calor desde el material eléctricamente conductor 110 y mover (por ejemplo, bombear) el material eléctricamente conductor 110 de regreso a la región de acumulación 140 a través del primer puerto 144 para calentarlo nuevamente mediante reacciones de fusión que tienen lugar en el sistema de confinamiento de plasma 100. En la Figura 1, el primer puerto 144 es mostrado encima del segundo puerto 146, sin embargo, en otros ejemplos el segundo puerto 146 podría estar encima del primer puerto 144. Un experto en la técnica reconocerá que, en varios ejemplos, los puertos 144 y 146 pueden tener varias posiciones relativas.

20 Como se señaló anteriormente, la pared axial 136 incluye un extremo 148 que mira al segundo extremo 122 del electrodo externo. El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye una primera bomba 150 configurada para mover el material eléctricamente conductor 110 desde la región de acumulación 140 hasta una región 152 que está fuera de la pared axial 136 y separada de la región de acumulación 140 por la pared radial 138. La primera bomba 150 está configurada para mover el material eléctricamente conductor 110 sobre el extremo 148 de la pared axial 136 hasta una región 154 dentro de la pared axial 136.

25 30 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye una segunda bomba 156 configurada para mover el material eléctricamente conductor 110 desde la región de acumulación 140 a la región 152 que está fuera de la pared axial 136 y separada de la región de acumulación 140 por la pared radial 138.

35 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye una bomba 170 (por ejemplo, una bomba turbomolecular) configurada para bombear aire fuera del sistema de confinamiento de plasma 100 de tal manera que la presión base dentro del sistema de confinamiento de plasma 100 está dentro del rango de 10^{-5} a 10^{-8} Torr.

40 45 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye uno o más puertos de gas 116 configurados para dirigir gas (por ejemplo, tritio, deuterio, helio-3, hidrógeno, un gas que contiene boro, o borano) desde una fuente de gas 128 (por ejemplo, un tanque de gas presurizado) en una región de aceleración 121 que está radialmente entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo. La región de aceleración 121 tiene una sección transversal sustancialmente anular definida por las conformaciones del electrodo interno 102 y la cubierta conductora sólida 108. Como se muestra en la Figura 1, el uno o más puertos de gas 116 están colocados axialmente entre el primer extremo 104 del electrodo interno 102 y el segundo extremo 126 del electrodo interno 102.

50 55 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye una fuente de alimentación 118 configurada para aplicar un voltaje entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108). La fuente de alimentación 118 generalmente tomará la forma de una batería de condensadores capaz de almacenar hasta 500 kJ o hasta 3-4 MJ, por ejemplo. Un terminal positivo de la fuente de alimentación 118 se puede acoplar al electrodo interno 102 o, alternativamente, al electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108).

55 60 El sistema de confinamiento de plasma 100 incluye una región de ensamblaje 124 dentro del electrodo externo entre el primer extremo 104 del electrodo interno 102 y el primer extremo 120 del electrodo externo. El sistema de confinamiento de plasma 100 está configurado para sostener un plasma por pinzamiento en Z dentro de la región de ensamblaje 124 como se describe a continuación.

65 70 El sistema de confinamiento de plasma 100 también incluye un aislante 117 entre el segundo extremo 122 del electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) y el electrodo interno 102 para mantener el aislamiento eléctrico entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo. El aislante 117 (por ejemplo, un material cerámico) generalmente tiene una sección transversal anular.

75 La Figura 2 es un diagrama esquemático en sección transversal de un sistema de confinamiento de plasma 200. El sistema de confinamiento de plasma 200 puede tener cualquiera de las características del sistema de confinamiento de plasma 100, con las diferencias que se describen a continuación. Una diferencia entre el sistema de confinamiento

de plasma 100 y el sistema de confinamiento de plasma 200 es la presencia del electrodo intermedio 205 como parte del sistema de confinamiento de plasma 200 como se describe a continuación.

El sistema de confinamiento de plasma 200 incluye un electrodo interno 202, un electrodo intermedio 205 (por ejemplo, un electrodo sustancialmente anular) que rodea al menos parcialmente el electrodo interno 202, y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo intermedio 205. El electrodo externo incluye una cubierta conductora sólida 208 y un material eléctricamente conductor 210 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 208 (por ejemplo, en el eje longitudinal 206). El material eléctricamente conductor 210 tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión. En varios ejemplos, el material eléctricamente conductor 210 puede tomar la forma de eutécticos, aleaciones, o mezclas de uno o más de litio, plomo, o estaño.

El electrodo interno 202 generalmente toma la forma de una cubierta eléctricamente conductora (por ejemplo, formada por uno o más de acero inoxidable, molibdeno, tungsteno, o cobre) que tiene un cuerpo sustancialmente cilíndrico. El electrodo interno 202 incluye un primer extremo 204 (por ejemplo, un extremo redondeado) y un segundo extremo opuesto 226 (por ejemplo, un extremo sustancialmente en forma de disco). El primer extremo 204 se podría formar de un material a base de carbono tal como grafito o fibra de carbono, o uno o más de acero inoxidable, molibdeno, tungsteno, o cobre, por ejemplo. En algunas realizaciones, el electrodo interno 202 tiene un revestimiento sobre su superficie externa que incluye un material eléctricamente conductor que tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión. En varios ejemplos, el material eléctricamente conductor puede tomar la forma de eutécticos, aleaciones, o mezclas de uno o más de litio, plomo, o estaño.

El electrodo intermedio 205 incluye un primer extremo 227 (por ejemplo, un extremo sustancialmente anular) entre el primer extremo 220 del electrodo externo y el segundo extremo 222 del electrodo externo. El electrodo intermedio 205 también incluye un segundo extremo opuesto 223 que es sustancialmente anular.

El sistema de confinamiento de plasma 200 incluye además un mecanismo de alimentación 212 (por ejemplo, un sistema electromecánico) que está configurado para mover el electrodo interno 202 dentro o fuera del sistema de confinamiento de plasma 200 a lo largo del eje longitudinal 206. Durante la operación, el electrodo 202 se puede erosionar por la descarga de plasma y el mecanismo de alimentación 212 se puede operar para alimentar el electrodo interno 202 para mantener el espacio relativo entre el electrodo interno 202 y otros componentes del sistema de confinamiento de plasma 200.

El sistema de confinamiento de plasma 200 incluye además un sistema de enfriamiento 214 (por ejemplo, un intercambiador de calor) que está configurado para enfriar el electrodo interno 202 durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 200.

El electrodo externo generalmente toma la forma de una cubierta eléctricamente conductora (por ejemplo, de acero inoxidable) que tiene un cuerpo sustancialmente cilíndrico. La cubierta conductora sólida 208 del electrodo externo incluye una cubierta externa conductora sólida 232 y una cubierta interna sólida 234 (por ejemplo, formada de material eléctricamente conductor o material de alta resistividad tal como carburo de silicio) que está dispuesta dentro de la cubierta externa conductora sólida 232 y en contacto con la cubierta externa conductora sólida 232. Más específicamente, la cubierta interna sólida 234 incluye una pared axial 236 que rodea al menos parcialmente el eje longitudinal 206 del sistema de confinamiento de plasma 200 (por ejemplo, rodea parcialmente el electrodo interno 202) y una pared radial 238 que acopla la pared axial 236 a la cubierta externa conductora sólida 232.

El electrodo externo incluye un primer extremo 220 y un segundo extremo opuesto 222. El primer extremo redondeado 204 del electrodo interno 202 está entre el primer extremo 220 (por ejemplo, un extremo sustancialmente en forma de disco) del electrodo externo y el segundo extremo 222 (por ejemplo, un extremo sustancialmente circular o anular) del electrodo externo. La pared radial 238 y un primer extremo 220 del electrodo externo forman una región de acumulación 240 dentro de la cámara de confinamiento de plasma 200. La región de acumulación 240 sirve como depósito para una cantidad sustancial del material eléctricamente conductor 210 (por ejemplo, líquido) que está en la cámara de confinamiento de plasma 200. Como se muestra, el material eléctricamente conductor 210 también se puede hacer circular sobre el extremo 248 de la pared axial 236 mediante una bomba 250 y/o una bomba 256 como se discute con más detalle a continuación.

El electrodo externo (es decir, la cubierta conductora sólida 208 y el material eléctricamente conductor 210) rodea gran parte del electrodo interno 202. El electrodo interno 202 y el electrodo externo pueden ser concéntricos y tener simetría radial con respecto al eje longitudinal 206.

El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye un intercambiador de calor 242, un primer puerto 244 configurado para guiar el material eléctricamente conductor 210 desde el intercambiador de calor 242 en la región de acumulación 240, y un segundo puerto 246 configurado para guiar el material eléctricamente conductor 210 desde la región de acumulación 240 hasta el intercambiador de calor 242. El intercambiador de calor 242 está configurado para recibir, a través del segundo puerto 246, el material eléctricamente conductor 210 que se calienta dentro del sistema de confinamiento de plasma 200, extraer calor desde el material eléctricamente conductor 210 y mover (por ejemplo,

bombear) el material eléctricamente conductor 210 de regreso en la región de acumulación 240 a través del primer puerto 244 para calentarlo nuevamente mediante reacciones de fusión que tienen lugar en el sistema de confinamiento de plasma 200. En la Figura 2, el primer puerto 244 es mostrado encima del segundo puerto 246, sin embargo, en otros ejemplos el segundo puerto 246 podría estar encima del primer puerto 244. Un experto en la técnica reconocerá que, en varios ejemplos, los puertos 244 y 246 pueden tener varias posiciones relativas.

Como se señaló anteriormente, la pared axial 236 incluye un extremo 248 que mira al segundo extremo 222 del electrodo externo. El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye una primera bomba 250 configurada para mover el material eléctricamente conductor 210 desde la región de acumulación 240 hasta una región 252 que está fuera de la pared axial 236 y separada de la región de acumulación 240 por la pared radial 238. La primera bomba 250 está configurada para mover el material eléctricamente conductor 210 sobre el extremo 248 de la pared axial 236 hasta una región 254 dentro de la pared axial 236.

El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye una segunda bomba 256 configurada para mover el material eléctricamente conductor 210 desde la región de acumulación 240 hasta la región 252 que está fuera de la pared axial 236 y separada de la región de acumulación 240 por la pared radial 238.

15 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye una bomba 270 (por ejemplo, una bomba turbomolecular) configurada para bombear aire fuera del sistema de confinamiento de plasma 200 de tal manera que la presión base dentro del sistema de confinamiento de plasma 200 está dentro del rango de 10^{-5} a 10^{-8} Torr.

20 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye uno o más puertos de gas 216 configurados para dirigir gas (por ejemplo, tritio, deuterio, helio-3, hidrógeno, un gas que contiene boro, o borano) desde una fuente de gas 228 (por ejemplo, un tanque de gas presurizado) en una región de aceleración 218 que está radialmente entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205. La región de aceleración 218 tiene una sección transversal sustancialmente anular definida por las conformaciones del electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205. Como se muestra en la Figura 2, el uno o más puertos de gas 216 están colocados axialmente entre el primer extremo 204 del electrodo interno 202 y el segundo extremo 226 del electrodo interno 102.

25 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye una fuente de alimentación 218 configurada para aplicar un voltaje entre el electrodo interno 102 y el electrodo intermedio 205. La fuente de alimentación 218 generalmente tomará la forma de un banco de condensadores capaz de almacenar hasta 500 kJ. o hasta 3-4 MJ, por ejemplo. Un terminal positivo de la fuente de alimentación 218 se puede acoplar al electrodo interno 102 o, alternativamente, al electrodo intermedio 205.

30 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye una fuente de alimentación 219 configurada para aplicar un voltaje entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 208). La fuente de alimentación 219 generalmente tomará la forma de una batería de condensadores capaz de almacenar hasta 500 kJ o hasta 3-4 MJ, por ejemplo. Un terminal positivo de la fuente de alimentación 219 se puede acoplar al electrodo interno 102 o, alternativamente, al electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 208).

35 El sistema de confinamiento de plasma 200 incluye una región de ensamblaje 224 dentro del electrodo externo entre el primer extremo 204 del electrodo interno 202 y el primer extremo 220 del electrodo externo. El sistema de confinamiento de plasma 200 está configurado para sostener un plasma por pinzamiento en Z dentro de la región de ensamblaje 224 como se describe a continuación.

40 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye un aislante 217 entre el segundo extremo 223 del electrodo intermedio 205 y el electrodo interno 202 para mantener el aislamiento eléctrico entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205. El aislante 217 (por ejemplo, un material cerámico) tiene generalmente una sección transversal anular.

45 El sistema de confinamiento de plasma 200 también incluye un aislante 229 entre la cubierta conductora sólida 208 y el electrodo intermedio 205 para mantener el aislamiento eléctrico entre la cubierta conductora sólida 208 y el electrodo intermedio 205. El aislante 229 (por ejemplo, un material cerámico) generalmente tiene una sección transversal anular.

50 La Figura 3 es un diagrama de bloques de un método 300 para operar un sistema de confinamiento de plasma (por ejemplo, el sistema de confinamiento de plasma 100). El sistema de confinamiento de plasma incluye un electrodo interno que tiene un primer extremo redondeado que está dispuesto sobre un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo interno. Las Figuras 4-9 ilustran algunos de los aspectos del método 300 como se describe a continuación. Aunque las Figuras 4-9 muestran el eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100 alineado horizontalmente, en la práctica el eje longitudinal 106 generalmente estará alineado verticalmente.

En el bloque 302, el método 300 incluye hacer fluir gas en el sistema de confinamiento de plasma.

55 Como se muestra en la Figura 4, por ejemplo, el uno o más puertos de gas 116 pueden dirigir el gas 310 (por ejemplo, uno o más de tritio, deuterio, helio-3, hidrógeno, un gas que contiene boro, o borano) en la región de aceleración 121 entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) que rodea

sustancialmente el electrodo interno 102. La Figura 4 muestra una cantidad inicial del gas 310 que entra en la región de aceleración 121 y la Figura 5 muestra una cantidad adicional del gas 310 que entra en la región de aceleración 121 a partir de entonces.

- 5 Después de hacer fluir el gas 310, una presión de gas adyacente al uno o más puertos de gas 116 dentro de la región de aceleración 121 podría estar dentro de un rango de 1000 a 5800 Torr (por ejemplo, 5450 a 5550 Torr) antes del voltaje entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) que se aplican a través de la fuente de alimentación 118.

En el bloque 304, el método 300 incluye aplicar, a través de una fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo externo, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas en un plasma por pinzamiento en Z que fluye entre (i) un material eléctricamente conductor dispuesto sobre una cubierta conductora sólida del electrodo externo y sobre el eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma y (ii) el primer extremo redondeado del electrodo interno. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 170 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión.

10 15 Con referencia a las Figuras 6-9, por ejemplo, la fuente de alimentación 118 puede aplicar un voltaje entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108), convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas 310 en un plasma por pinzamiento en Z 318 (ver Figuras 8-9) que fluye entre (i) el material eléctricamente conductor 110 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 108 del electrodo externo y sobre el eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100 y (ii) el primer extremo redondeado 104 del electrodo interno 102.

20 25 Por ejemplo, la fuente de alimentación 118 puede aplicar el voltaje entre el electrodo interno 102 y la cubierta conductora sólida 108, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas 310 en un plasma 316 (ver Figuras 6-9) que tiene una sección transversal anular. Debido al campo magnético generado por su propia corriente, el plasma 316 puede fluir axialmente dentro de la región de aceleración 121 hacia el primer extremo 104 del electrodo interno 102 y el primer extremo 120 del electrodo externo como se muestra secuencialmente en las Figuras 6-9.

30 35 Como se muestra en las Figuras 8 y 9, cuando el plasma 316 se mueve más allá de la región de aceleración 121, el plasma por pinzamiento en Z 318 se establece en la región de ensamblaje 124 dentro del electrodo externo entre (i) el material eléctricamente conductor 110 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 108 del electrodo externo y sobre el eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100 y (ii) el primer extremo redondeado 104 del electrodo interno 102.

40 45 El plasma por pinzamiento en Z 318 puede exhibir un flujo axial cizallado y tener un radio de entre 0.1 mm y 5 mm, una temperatura de iones de entre 900 y 50,000 eV, una temperatura de electrones mayor de 500 eV (por ejemplo, hasta 50,000 eV), una densidad de número de iones mayor de 1×10^{23} iones/m³ una densidad de número de electrones mayor de 1×10^{23} electrones/m³ un campo magnético superior a 8 T, y/o puede ser estable durante al menos 10 µs.

50 55 En el bloque 306, el método 300 incluye mover una primera porción líquida del material eléctricamente conductor fuera del sistema de confinamiento de plasma. La primera porción líquida del material eléctricamente conductor se calienta a través de productos de reacción (por ejemplo, neutrones y otras partículas energéticas) del plasma tipo Z-pinch.

El intercambiador de calor 142 puede recibir (por ejemplo, bombeare), a través del segundo puerto 146, una porción del material eléctricamente conductor 110 que se calienta dentro del sistema de confinamiento de plasma 100, extraer calor desde el material eléctricamente conductor 110, y mover (por ejemplo, bombeare) el material eléctricamente conductor 110 de regreso en la región de acumulación 140 a través del primer puerto 144 para calentarlo nuevamente mediante reacciones de fusión que tienen lugar en el sistema de confinamiento de plasma 100. Antes de formar una descarga de plasma dentro del sistema de confinamiento de plasma 100, el material eléctricamente conductor 110 generalmente se calienta (por ejemplo, se funde) en un estado líquido utilizando un elemento de calentamiento (por ejemplo, eléctrico) dispuesto dentro del sistema de confinamiento de plasma 100.

50 55 El sistema de confinamiento de plasma 100 incluye un mecanismo de alimentación 112 (por ejemplo, un sistema electromecánico) que puede mover el electrodo interno 102 dentro o fuera del sistema de confinamiento de plasma 100 a lo largo del eje longitudinal 106. Durante la operación, el electrodo interno 102 se puede erosionar por la descarga de plasma y el mecanismo de alimentación 112 se puede operar para alimentar en el electrodo interno 102 para mantener el espacio relativo entre el electrodo interno 102 y otros componentes del sistema de confinamiento de plasma 100.

Además, las bombas 150 y 156 pueden mover o hacer circular el material eléctricamente conductor 110 sobre el electrodo externo (por ejemplo, sobre la cubierta conductora sólida 108) de tal manera que diferentes porciones del material eléctricamente conductor 110 se puedan utilizar para absorber corriente y/o calor (por ejemplo, en el eje longitudinal 106) desde el plasma por pinzamiento en Z 318 a lo largo del tiempo. Durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 100, gran parte o todo el material eléctricamente conductor 110 estará generalmente en estado líquido.

En algunas realizaciones, las bombas 150 y 156 mueven el material eléctricamente conductor 110 de tal manera que el material eléctricamente conductor 110 movido sobre el electrodo externo (por ejemplo, sobre la cubierta conductora sólida 108) se mueve en una dirección azimutal (por ejemplo, en y/o fuera de la página) y/o una dirección axial con respecto al eje longitudinal 106 del sistema de confinamiento de plasma 100.

- 5 Más específicamente, las bombas 150 o 156 pueden mover el material eléctricamente conductor 110 desde la región de acumulación 140 hasta una región 152 que está fuera de la pared axial 136 y separada de la región de acumulación 140 por la pared radial 138. Adicionalmente, las bombas 150 o 156 pueden mover el material eléctricamente conductor 110 sobre el extremo 148 de la pared axial 136 a una región 154 dentro de la pared axial 136, y de regreso hacia la región de acumulación 140.
- 10 En varias realizaciones, el voltaje aplicado entre el electrodo interno 102 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) está dentro de un rango de 2 kV a 30 kV. El voltaje aplicado entre el electrodo interno y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) puede dar como resultado un campo eléctrico radial dentro de un rango de 30 kV/m a 500 kV/m.
- 15 En algunas realizaciones, el plasma por pinzamiento en Z 318 tiene un radio de entre 0.1 mm y 5 mm, una temperatura de iones entre 900 y 50,000 eV y una temperatura de electrones mayor de 500 eV (por ejemplo, hasta 50,000 eV). El plasma por pinzamiento en Z 318 puede tener una densidad numérica de iones mayor que 1×10^{23} iones/m³ o una densidad numérica de electrones mayor que 1×10^{23} electrones/m³, y puede exhibir un flujo cizallado con un campo magnético superior a 8 T. El plasma por pinzamiento en Z 318 puede exhibir estabilidad durante al menos 10 µs.
- 20 En algunas realizaciones, los productos de reacción del plasma por pinzamiento en Z 318 incluyen neutrones. Como tal, durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 100, se pueden consumir neutrones y una porción del material eléctricamente conductor 110 para generar combustible de tritio adicional para su recuperación en el intercambiador de calor 142. La naturaleza reactiva del material eléctricamente conductor 110 también puede servir para reducir la presión base dentro del sistema de confinamiento de plasma 100 al capturar partículas de vapor.
- 25 Algunas realizaciones incluyen controlar el grosor del material eléctricamente conductor 110 sobre la cubierta conductora sólida 108 al ajustar la velocidad a la que el intercambiador de calor 142 mueve el material eléctricamente conductor 110 en la región de acumulación 140 desde el intercambiador de calor 142 o al ajustar una velocidad a la que el material eléctricamente conductor 110 se mueve hacia el intercambiador de calor 142 desde la región de acumulación 140. Aumentar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor 110 fluye en la región de acumulación 140 generalmente aumentará el grosor del material eléctricamente conductor 110 sobre la cubierta conductora sólida 108. Aumentar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor 110 fluye fuera de la región de acumulación 140 hacia el intercambiador de calor 142 generalmente disminuirá el grosor del material eléctricamente conductor 110 sobre la cubierta conductora sólida 108.
- 30 La Figura 10 es un diagrama de bloques de un método 1000 para operar un sistema de confinamiento de plasma (por ejemplo, el sistema de confinamiento de plasma 200). El sistema de confinamiento de plasma incluye un electrodo interno, un electrodo intermedio que rodea al menos parcialmente el electrodo interno, y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo intermedio. Las Figuras 11-16 ilustran algunos de los aspectos del método 1000 como se describe a continuación. Aunque las Figuras 11-16 muestran el eje longitudinal 206 del sistema de confinamiento de plasma 200 alineado horizontalmente, en la práctica el eje longitudinal 206 generalmente estará alineado verticalmente.
- 35 40 En el bloque 1002, el método 1000 incluye hacer fluir gas hacia una región de aceleración entre el electrodo interno y el electrodo intermedio.
- 45 Como se muestra en la Figura 11, por ejemplo, el uno o más puertos de gas 216 pueden dirigir el gas 310 (por ejemplo, uno o más de tritio, deuterio, helio-3, hidrógeno, un gas que contiene boro, o borano) en la región de aceleración 221 entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205 que rodea parcialmente el electrodo interno 202. La Figura 11 muestra una cantidad inicial del gas 310 que ingresa a la región de aceleración 221 y la Figura 12 muestra una cantidad adicional del gas 310 que ingresa a la región de aceleración 221 a partir de entonces.
- 50 Después de hacer fluir el gas 310, una presión de gas adyacente al uno o más puertos de gas 216 dentro de la región de aceleración 221 podría estar dentro de un rango de 1000 a 5800 Torr (por ejemplo, 5450 a 5550 Torr) antes del voltaje entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205 que se aplican a través de la fuente de alimentación 218.
- 55 En el bloque 1004, el método 1000 incluye aplicar, a través de una primera fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo intermedio, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas en un plasma que tiene una sección transversal sustancialmente anular, el plasma fluye axialmente dentro de la región de aceleración hacia un primer extremo del electrodo interno y un primer extremo del electrodo externo.
- 60 Con referencia a las Figuras 11-14, por ejemplo, la fuente de alimentación 218 puede aplicar un voltaje entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas 310 en un plasma 316 que tiene una sección trasversal sustancialmente anular. El plasma 316 puede fluir axialmente dentro

de la región de aceleración 221 hacia un primer extremo 204 del electrodo interno 202 y un primer extremo 220 del electrodo externo. Debido al campo magnético generado por su propia corriente, el plasma 316 puede fluir axialmente dentro de la región de aceleración 121 hacia el primer extremo 204 del electrodo interno 202 y el primer extremo 220 del electrodo externo como se muestra secuencialmente en las Figuras 11-14.

- 5 En el bloque 1006, el método 1000 incluye aplicar, a través de una segunda fuente de alimentación, un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo externo para establecer un plasma por pinzamiento en Z que fluye entre (i) un material eléctricamente conductor dispuesto sobre una cubierta conductora sólida del electrodo externo y (ii) el primer extremo del electrodo interno. El material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión.
- 10 Con referencia a las Figuras 15 y 16, por ejemplo, la fuente de alimentación 219 puede aplicar un voltaje entre el electrodo interno 202 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 208) para establecer el plasma por pinzamiento en Z 318 que fluye entre (i) el material eléctricamente conductor 210 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 208 del electrodo externo y (ii) el primer extremo 204 del electrodo interno 202. El material eléctricamente conductor 210 tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C (por ejemplo, 180 °C a 550 °C) a 1 atmósfera de presión.
- 15

Como se muestra en las Figuras 15 y 16, cuando el plasma 316 se mueve más allá de la región de aceleración 221, el plasma por pinzamiento en Z 318 se establece en la región de ensamblaje 224 dentro del electrodo externo entre (i) el material eléctricamente conductor 210 dispuesto sobre la cubierta conductora sólida 208 del electrodo externo y sobre el eje longitudinal 206 del sistema de confinamiento de plasma 200 y (ii) el primer extremo redondeado 204 del electrodo interno 202.

El plasma por pinzamiento en Z 318 puede exhibir un flujo axial cizallado y tener un radio entre 0.1 mm y 5 mm, una temperatura de iones entre 900 y 50,000 eV, una temperatura de electrones mayor de 500 eV (por ejemplo, hasta 50,000 eV), una densidad de número de iones mayor de 1×10^{23} iones/m³ una densidad de número de electrones mayor de 1×10^{23} electrones /m³ un campo magnético superior a 8 T, y/o puede ser estable durante al menos 10 µs.

20 25 En el bloque 1008, el método 1000 incluye mover una primera porción líquida del material eléctricamente conductor fuera del sistema de confinamiento de plasma. La primera porción líquida del material eléctricamente conductor se calienta a través de productos de reacción del plasma tipo Z-pinch.

Con referencia a la Figura 2, por ejemplo, el intercambiador de calor 242 puede recibir (por ejemplo, bombear), a través del segundo puerto 246, una porción del material eléctricamente conductor 210 que se calienta dentro del sistema de confinamiento de plasma 200, extraer calor desde el material eléctricamente conductor 210, y mover (por ejemplo, bombear) el material eléctricamente conductor 210 de regreso en la región de acumulación 240 a través del primer puerto 244 para calentarse nuevamente mediante reacciones de fusión que tienen lugar en el sistema de confinamiento de plasma 200. Antes de formar una descarga de plasma dentro del sistema de confinamiento de plasma 200, el material eléctricamente conductor 210 generalmente se calienta (por ejemplo, se funde) a un estado líquido utilizando un elemento de calentamiento (por ejemplo, eléctrico) dispuesto dentro del sistema de confinamiento de plasma 200.

30 35 El sistema de confinamiento de plasma 200 incluye un mecanismo de alimentación 212 (por ejemplo, un sistema electromecánico) que puede mover el electrodo interno 202 en o fuera del sistema de confinamiento de plasma 200 a lo largo del eje longitudinal 206. Durante la operación, el electrodo interno 202 se puede erosionar por la descarga de plasma y el mecanismo de alimentación 212 se puede operar para alimentar el electrodo interno 202 para mantener el espacio relativo entre el electrodo interno 202 y otros componentes del sistema de confinamiento de plasma 200.

40 45 Además, las bombas 250 y 256 pueden mover o hacer circular el material eléctricamente conductor 210 sobre el electrodo externo (por ejemplo, sobre la cubierta conductora sólida 208) de tal manera que diferentes porciones del material eléctricamente conductor 210 se puedan utilizar para absorber corriente y/o calor (por ejemplo, en el eje longitudinal 206) del plasma por pinzamiento en Z 318 a lo largo del tiempo. Durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 200, gran parte o todo el material eléctricamente conductor 210 estará generalmente en estado líquido.

50 En algunas realizaciones, las bombas 250 y 256 mueven el material eléctricamente conductor 210 de tal manera que el material eléctricamente conductor 210 movido sobre el electrodo externo (por ejemplo, sobre la cubierta conductora sólida 208) se mueve en una dirección azimutal (por ejemplo, en y/o fuera de la página) y/o una dirección axial con respecto al eje longitudinal 206 del sistema de confinamiento de plasma 100.

55 Más específicamente, las bombas 250 o 256 pueden mover el material eléctricamente conductor 210 desde la región de acumulación 240 hasta una región 252 que está fuera de la pared axial 236 y separada de la región de acumulación 240 por la pared radial 238. Adicionalmente, las bombas 250 o 256 pueden mover el material eléctricamente conductor 210 sobre el extremo 248 de la pared axial 236 a una región 254 dentro de la pared axial 236, y de regreso hacia la región de acumulación 240.

En varias realizaciones, el voltaje aplicado entre el electrodo interno 202 y el electrodo externo (por ejemplo, la cubierta conductora sólida 108) o entre el electrodo interno 202 y el electrodo intermedio 205 está dentro de un rango de 2 kV a 30 kV. El voltaje aplicado puede generar campos eléctricos dentro de un rango de 30 kV/m a 500 kV/m.

- 5 En algunas realizaciones, el plasma por pinzamiento en Z 318 tiene un radio de entre 0.1 mm y 5 mm, una temperatura de iones entre 900 y 50,000 eV y una temperatura de electrones mayor de 500 eV (por ejemplo, hasta 50,000 eV). El plasma por pinzamiento en Z 318 puede tener una densidad numérica de iones mayor que 1×10^{23} iones/m³ o una densidad numérica de electrones mayor que 1×10^{23} electrones/m³, y puede exhibir un flujo cizallado con un campo magnético superior a 8 T. El plasma por pinzamiento en Z 318 puede exhibir estabilidad durante al menos 10 µs.
- 10 En algunas realizaciones, los productos de reacción del plasma por pinzamiento en Z 318 incluyen neutrones. Como tal, durante la operación del sistema de confinamiento de plasma 200, se pueden consumir neutrones y una porción del material eléctricamente conductor 210 para generar combustible de tritio adicional para recuperación en el intercambiador de calor 242. La naturaleza reactiva del material eléctricamente conductor 210 también puede servir para reducir la presión base dentro del sistema de confinamiento de plasma 200 al capturar partículas de vapor.
- 15 Algunas realizaciones incluyen controlar el grosor del material eléctricamente conductor 210 sobre la cubierta conductora sólida 208 al ajustar la velocidad a la que el intercambiador de calor 242 mueve el material eléctricamente conductor 210 en la región de acumulación 240 desde el intercambiador de calor 242 o al ajustar una velocidad a la que el material eléctricamente conductor 210 se mueve al intercambiador de calor 242 desde la región de acumulación 240. Aumentar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor 210 fluye en la región de acumulación 240 generalmente aumentará el grosor del material eléctricamente conductor 210 sobre la cubierta conductora sólida 208.
- 20 Aumentar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor 210 fluye fuera de la región de acumulación 240 hacia el intercambiador de calor 242 generalmente disminuirá el grosor del material eléctricamente conductor 210 sobre la cubierta conductora sólida 208.
- 25 Si bien en el presente documento se han divulgado varios aspectos de ejemplo y realizaciones de ejemplo, otros aspectos y realizaciones serán evidentes para los expertos en la técnica. Los varios aspectos de ejemplo y realizaciones de ejemplo divulgados en el presente documento tienen fines ilustrativos y no pretenden ser limitantes, con el alcance definido por las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de confinamiento de plasma (200) que comprende:
un electrodo interno (202);
un electrodo intermedio (205) que rodea al menos parcialmente el electrodo interno;
5 y
un electrodo externo que rodea al menos parcialmente al electrodo intermedio, el electrodo externo comprende:
una cubierta conductora sólida (208); y
un material eléctricamente conductor (210) dispuesto sobre la cubierta conductora sólida, en la que el material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión,
10 en el que
el sistema de confinamiento de plasma (200) comprende además un sistema de bombeo configurado para hacer circular el material eléctricamente conductor (210) sobre el electrodo externo cuando el material eléctricamente conductor está en estado líquido.
2. El sistema de confinamiento de plasma de la reivindicación 1, que comprende además uno o más puertos de gas (216) configurados para dirigir gas desde una fuente de gas (228) en una región de aceleración (218) que está radialmente entre el electrodo interno (202) y el electrodo intermedio (205).
15
3. El sistema de confinamiento de plasma de la reivindicación 2, en el que la región de aceleración (218) tiene una sección transversal sustancialmente anular.
20
4. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende además un mecanismo de alimentación (212) que está configurado para mover el electrodo interno (202) a lo largo de un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma (200).
25
5. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además un sistema de enfriamiento (214) que está configurado para enfriar el electrodo interno (202) durante la operación del sistema de confinamiento de plasma (200).
30
6. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende además:
una primera fuente de alimentación (218) configurada para aplicar un voltaje entre el electrodo interno (202) y el electrodo intermedio (205); y
una segunda fuente de alimentación (219) configurada para aplicar un voltaje entre el electrodo interno (202) y el electrodo externo.
35
7. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
una fuente de gas (228); y uno o más reguladores configurados para controlar el flujo de gas desde la fuente de gas a través de uno o más puertos de gas (216) respectivos, en los que la fuente de gas contiene uno o más de tritio, deuterio, helio-3, hidrógeno, boro, o borano.
40
8. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el material eléctricamente conductor (210) comprende uno o más de litio, plomo, o estaño.
45
9. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la cubierta conductora sólida comprende:
una cubierta externa conductora sólida (232); y
una cubierta interna sólida (234) que está dispuesta dentro de la cubierta externa conductora sólida y en contacto con la cubierta externa conductora sólida,
en la que la cubierta interna sólida comprende:
una pared axial (236) que rodea al menos parcialmente el eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma (200); y
una pared radial (238) que acopla la pared axial a la cubierta externa conductora sólida, en la que la pared radial y un primer extremo del electrodo externo forman una región de acumulación (240), el sistema de confinamiento de plasma comprende además:

un intercambiador de calor (242); y

un primer puerto (244) configurado para guiar el material eléctricamente conductor (210) desde el intercambiador de calor en la región de acumulación.

5 10. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de bombeo está configurado para hacer circular el material eléctricamente conductor (210) de tal manera que el movimiento del material eléctricamente conductor incluye uno o más de un componente azimutal o un componente axial con respecto al eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma (200).

11. El sistema de confinamiento de plasma de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, un primer extremo (204) del electrodo interno (202) que está formado de grafito o fibra de carbono.

10 12. Un método para operar un sistema de confinamiento de plasma (200) que comprende un electrodo interno (202), un electrodo intermedio (205) que rodea al menos parcialmente el electrodo interno, y un electrodo externo que rodea al menos parcialmente el electrodo intermedio, el método comprende:

hacer fluir gas en una región de aceleración (218) entre el electrodo interno y el electrodo intermedio;

15 aplicar, a través de una primera fuente de alimentación (218), un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo intermedio, convirtiendo de esta manera al menos una porción del gas en un plasma que tiene una sección transversal sustancialmente anular, el plasma fluye axialmente dentro de la región de aceleración hacia un primer extremo (204) del electrodo interno (202) y un primer extremo del electrodo externo;

20 20 aplicar, a través de una segunda fuente de alimentación (219), un voltaje entre el electrodo interno y el electrodo externo para establecer un plasma por pinzamiento en Z que fluye entre (i) un material eléctricamente conductor (210) dispuesto sobre una cubierta conductora sólida (208) del electrodo externo y (ii) el primer extremo (204) del electrodo interno (202), en el que el material eléctricamente conductor tiene un punto de fusión dentro de un rango de 180 °C a 800 °C a 1 atmósfera de presión; y

25 mover una primera porción líquida del material eléctricamente conductor fuera del sistema de confinamiento de plasma (210), en el que la primera porción líquida del material eléctricamente conductor se calienta a través de productos de reacción del plasma por pinzamiento en Z, en el que

el sistema de confinamiento de plasma (200) comprende un sistema de bombeo configurado para hacer circular el material eléctricamente conductor (210) sobre el electrodo externo cuando el material eléctricamente conductor está en estado líquido.

30 13. El método de la reivindicación 12, en el que el sistema de confinamiento de plasma (200) comprende además un sistema de enfriamiento (214) que está configurado para enfriar el electrodo interno (202) durante la operación del sistema de confinamiento de plasma.

14. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12-13, en el que el plasma por pinzamiento en Z exhibe un flujo cizallado.

35 15. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12-14, en el que el material eléctricamente conductor (210) comprende uno o más de litio, plomo, o estaño.

16. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12-15, en el que la cubierta conductora sólida (208) comprende: una cubierta externa conductora sólida (232); y

una cubierta interna sólida (234) que está dispuesta dentro de la cubierta externa conductora sólida y en contacto con la cubierta externa conductora sólida,

40 40 en la que la cubierta interna sólida comprende:

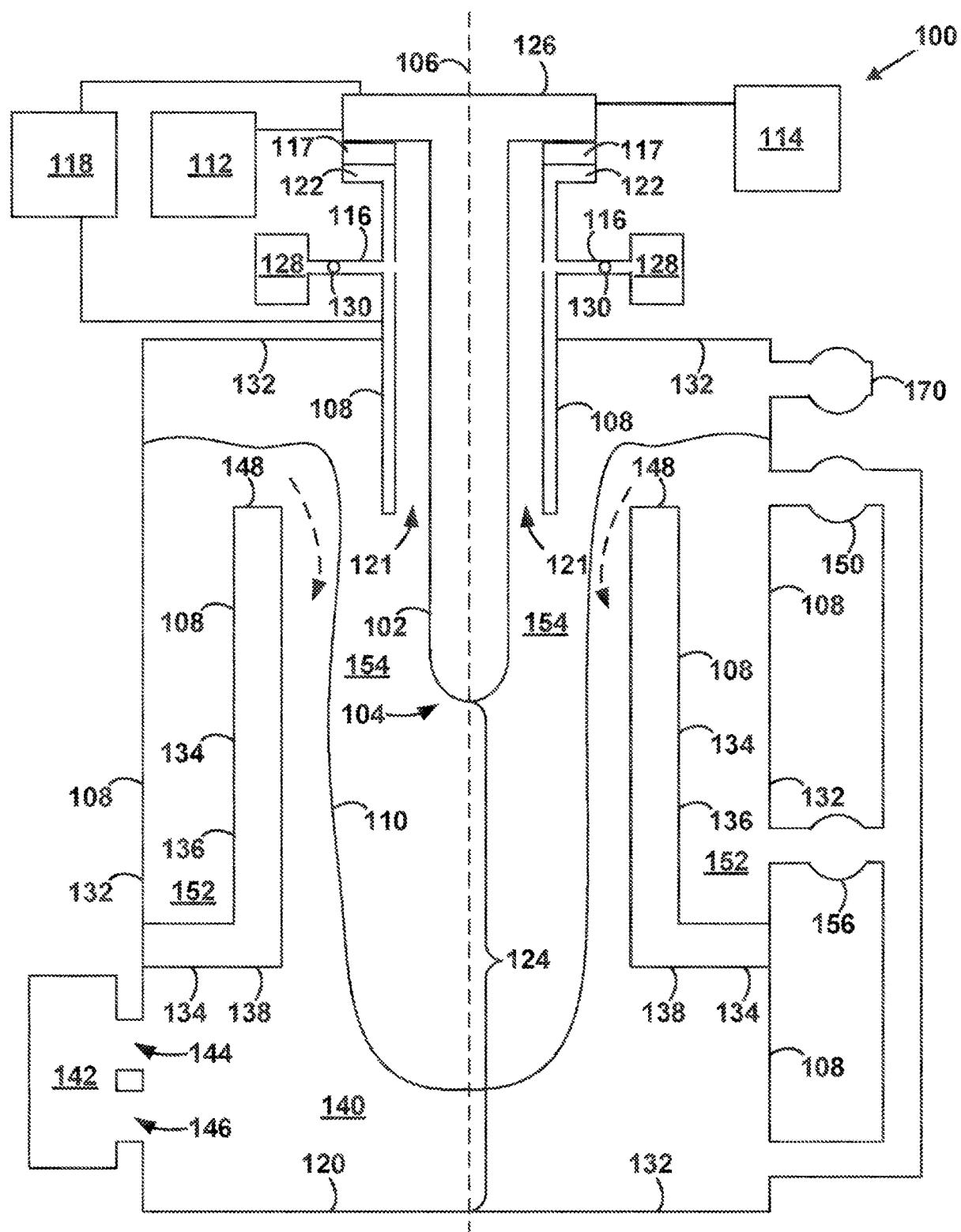
una pared axial (236) que rodea al menos parcialmente un eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma; y

una pared radial (238) que acopla la pared axial a la cubierta externa conductora sólida, en la que la pared radial y un primer extremo del electrodo externo forman una región de acumulación (240), el método comprende además:

45 mover, a través de un primer puerto del sistema de confinamiento de plasma (200), una segunda porción líquida del material eléctricamente conductor (210) desde un intercambiador de calor (242) en la región de acumulación.

17. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12-16, que comprende además mover el material eléctricamente conductor (210) sobre el electrodo externo, en el que el material eléctricamente conductor movido sobre el electrodo externo está en estado líquido.

18. El método de la reivindicación 17, en el que mover el material eléctricamente conductor (210) sobre el electrodo externo comprende mover el material eléctricamente conductor de tal manera que el movimiento del material eléctricamente conductor incluya uno o más de un componente azimutal o un componente axial con respecto al eje longitudinal del sistema de confinamiento de plasma (200).
- 5 19. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12-18, que comprende además controlar el grosor del material eléctricamente conductor (210) sobre la cubierta conductora sólida (208) al ajustar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor se mueve en la región de acumulación (240) desde el intercambiador de calor (242) o al ajustar la velocidad a la que el material eléctricamente conductor se mueve al intercambiador de calor desde la región de acumulación.



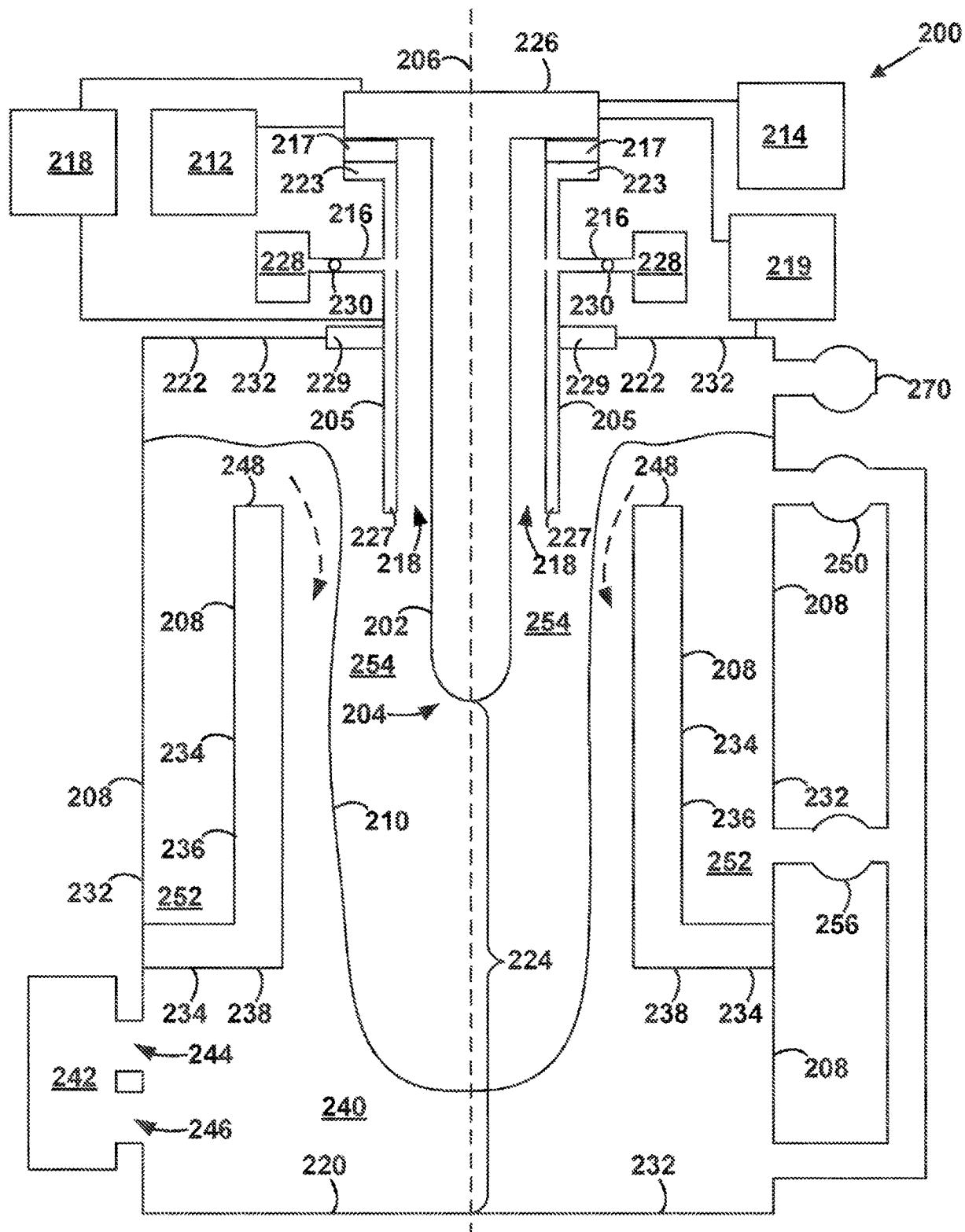


FIG. 2

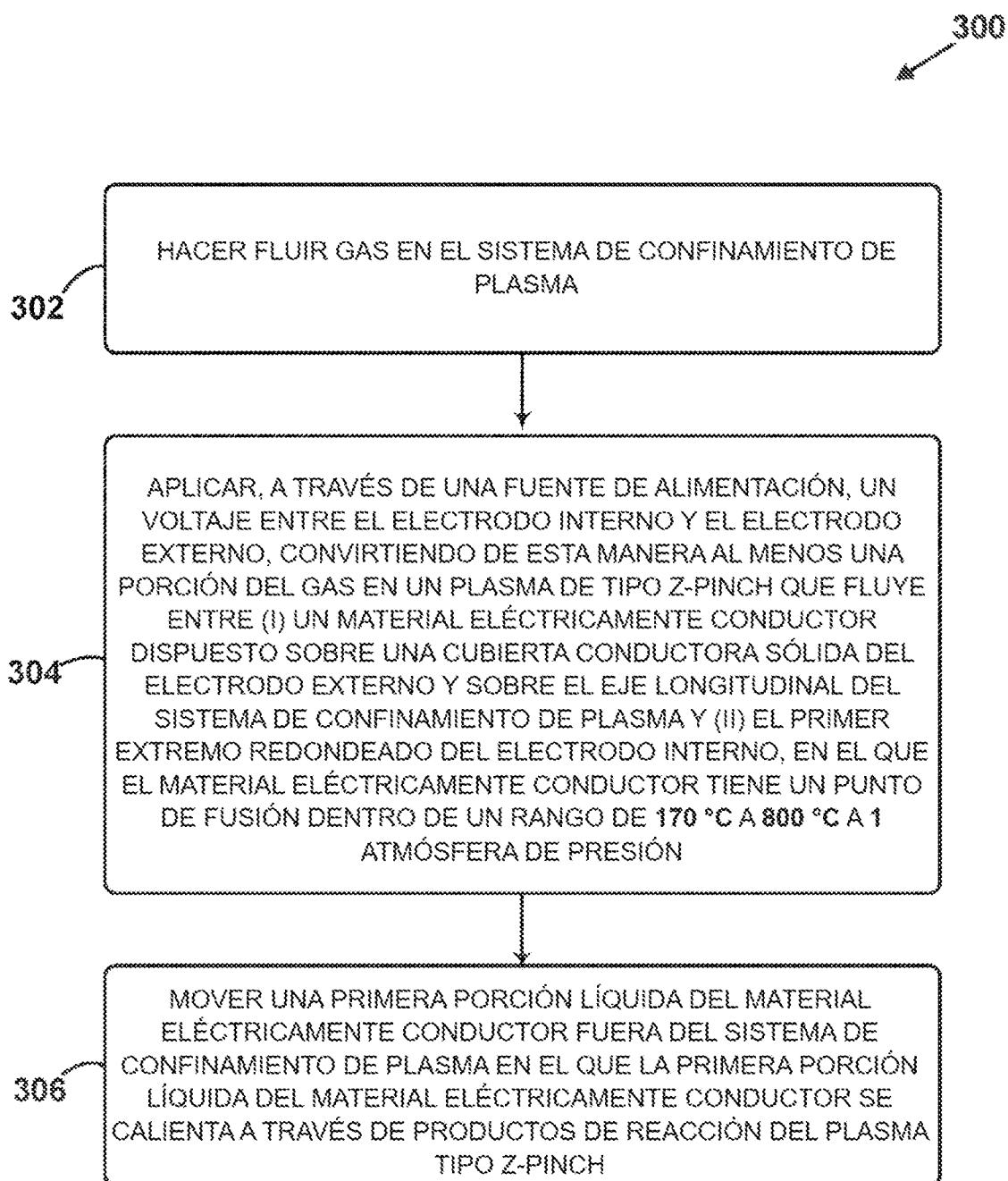


FIG. 3

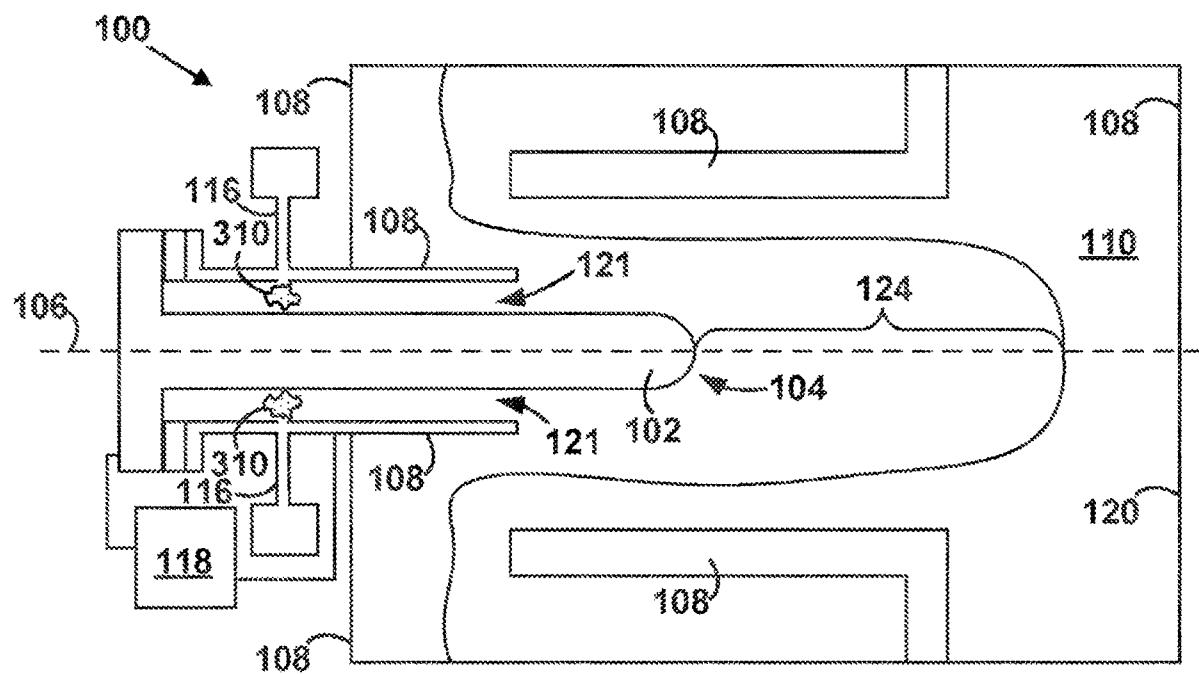


FIG. 4

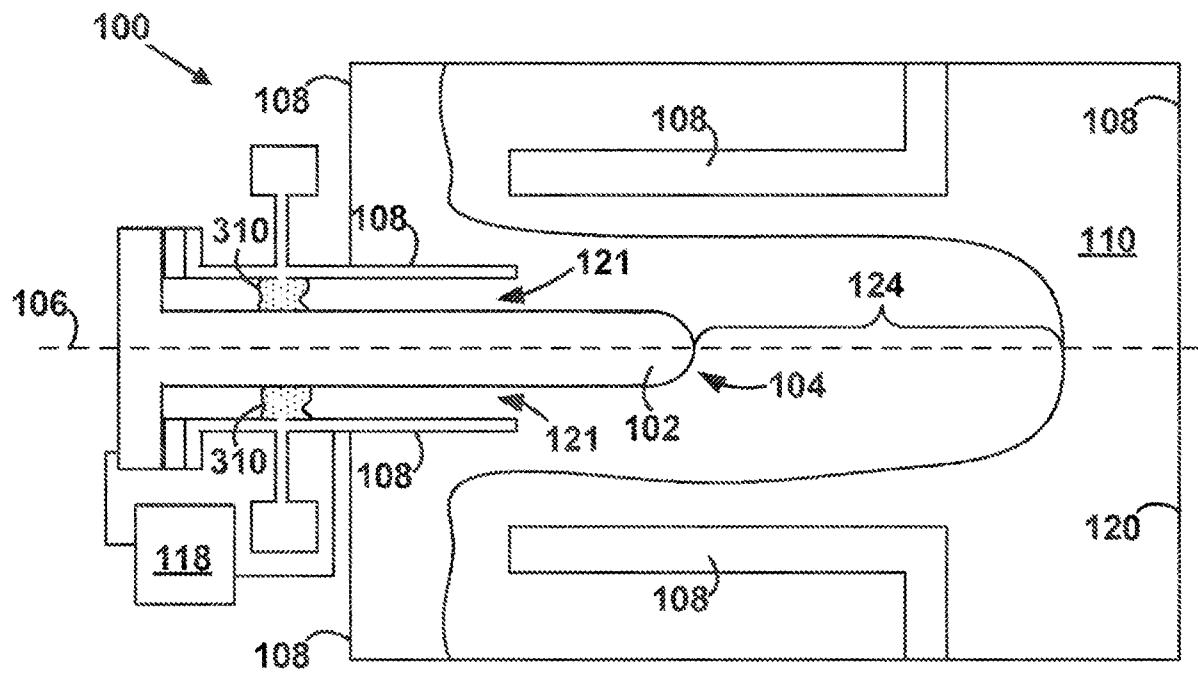


FIG. 5

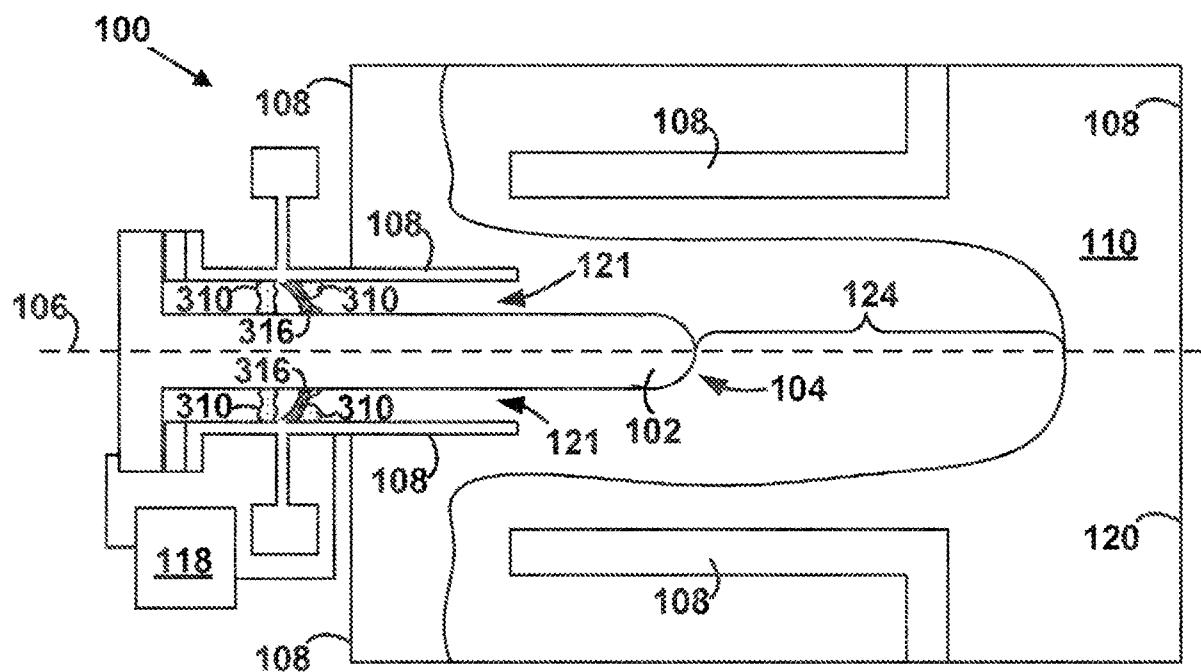


FIG. 6

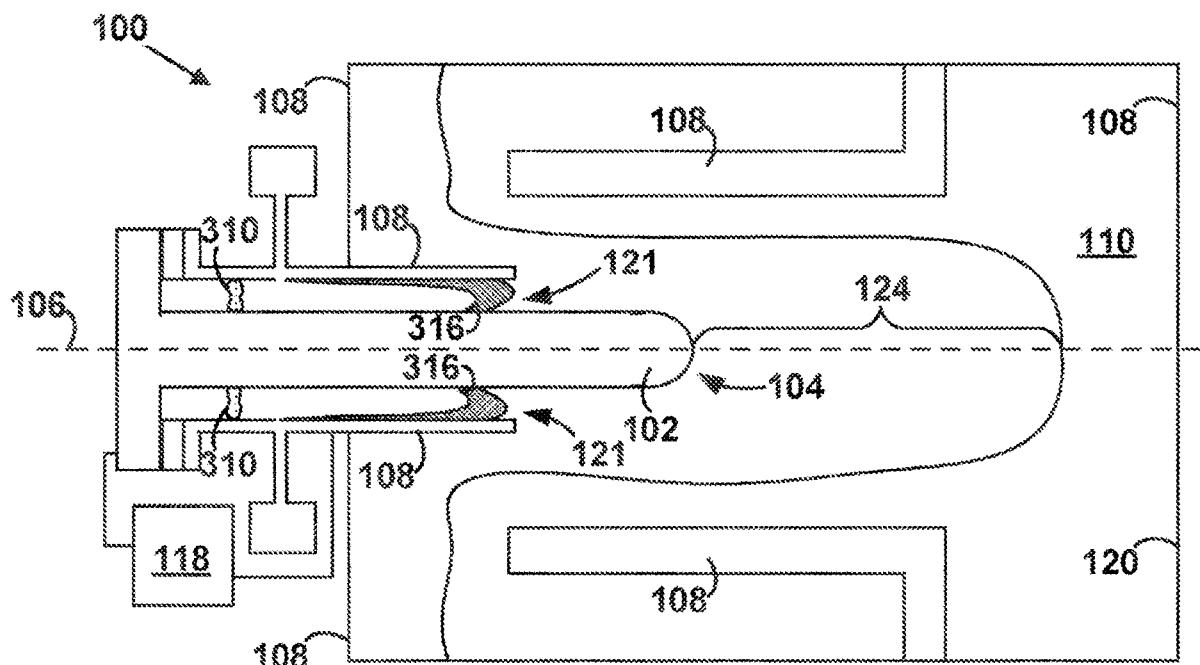


FIG. 7

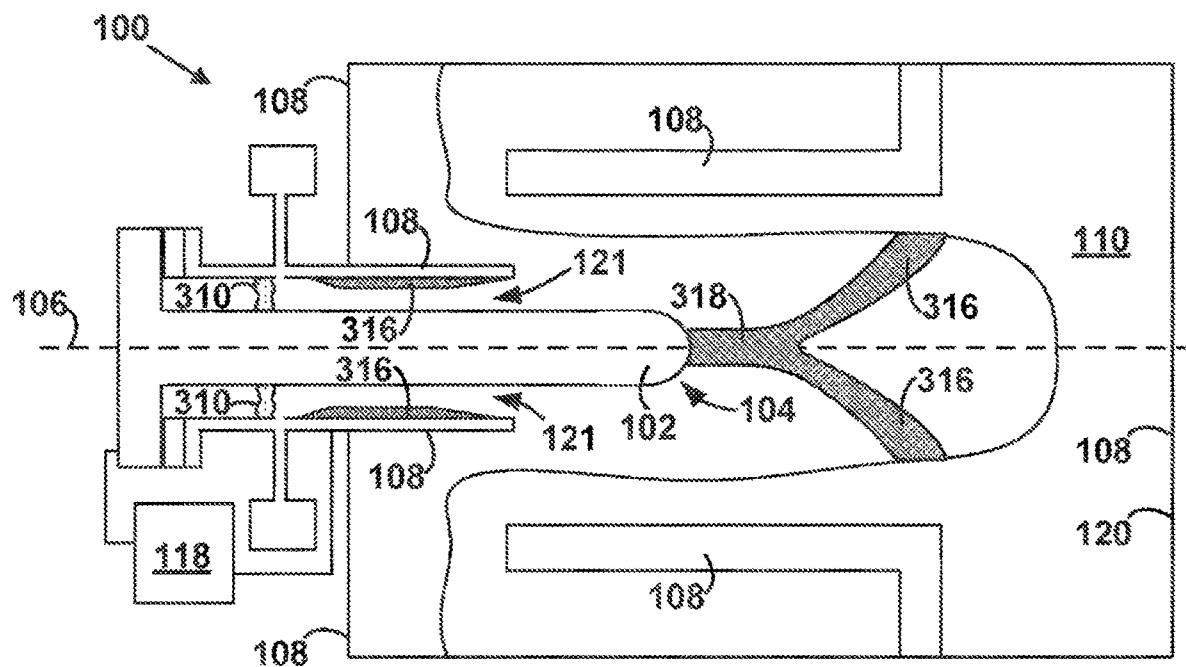


FIG. 8

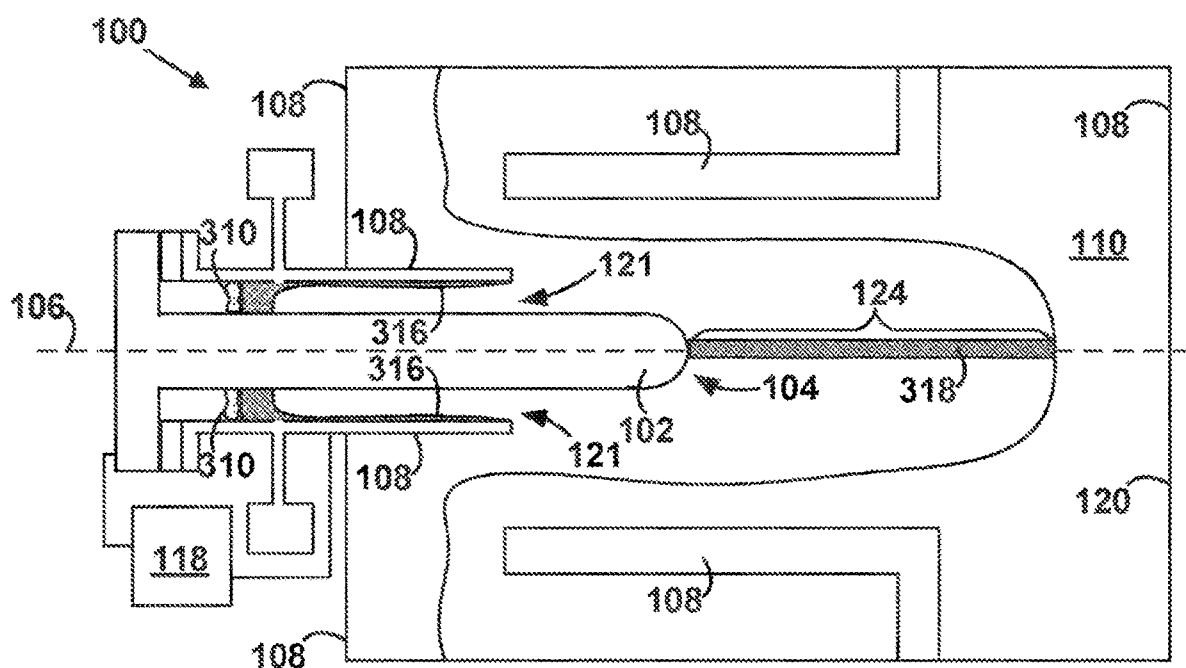


FIG. 9

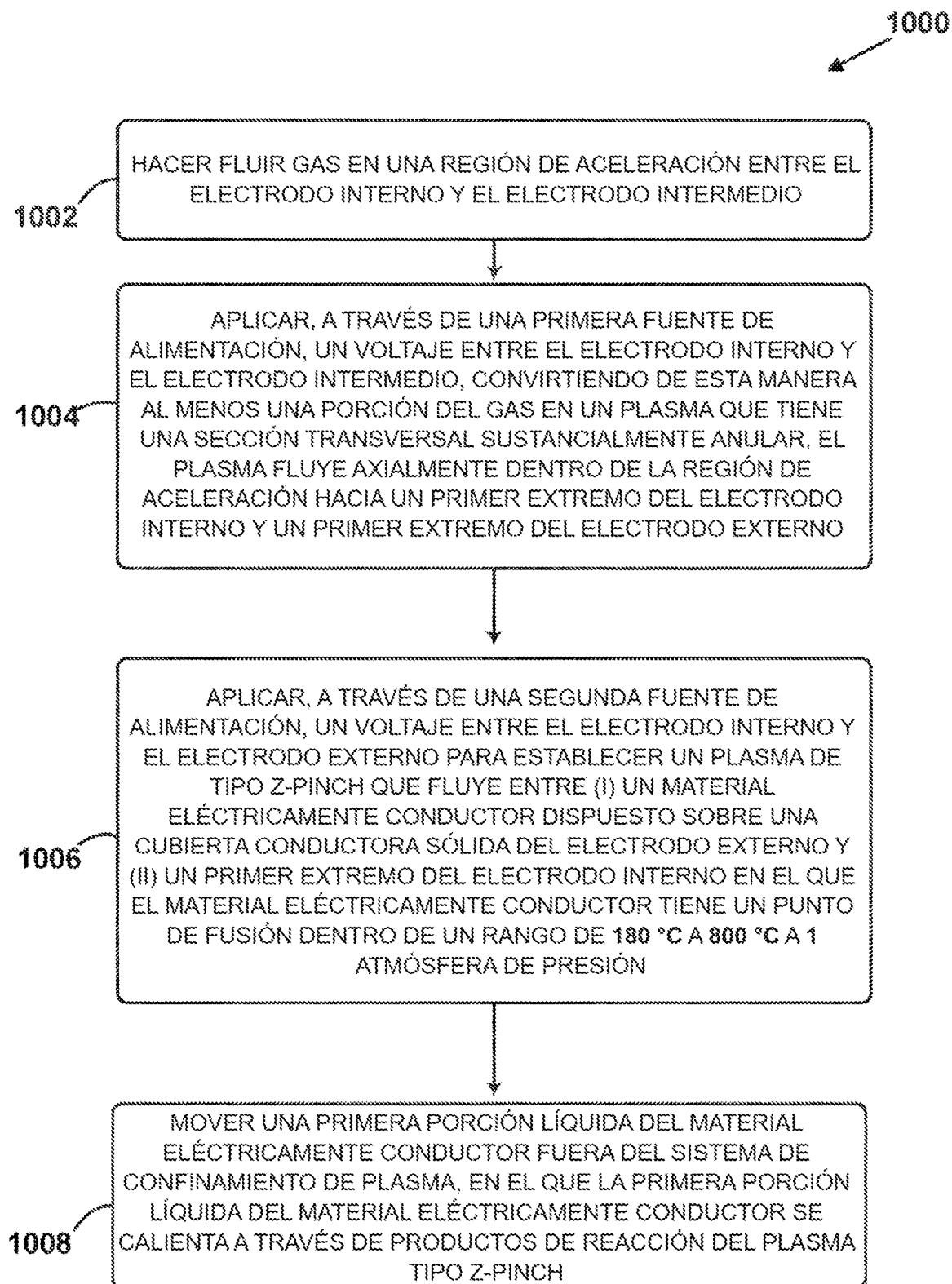


FIG. 10

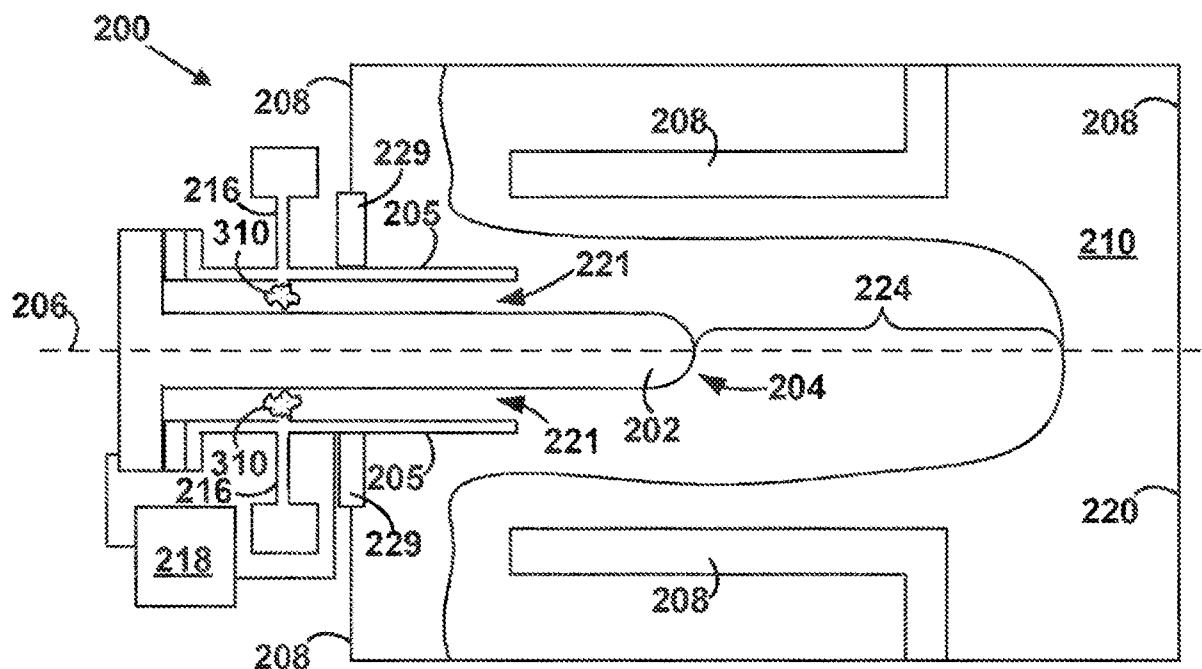


FIG. 11

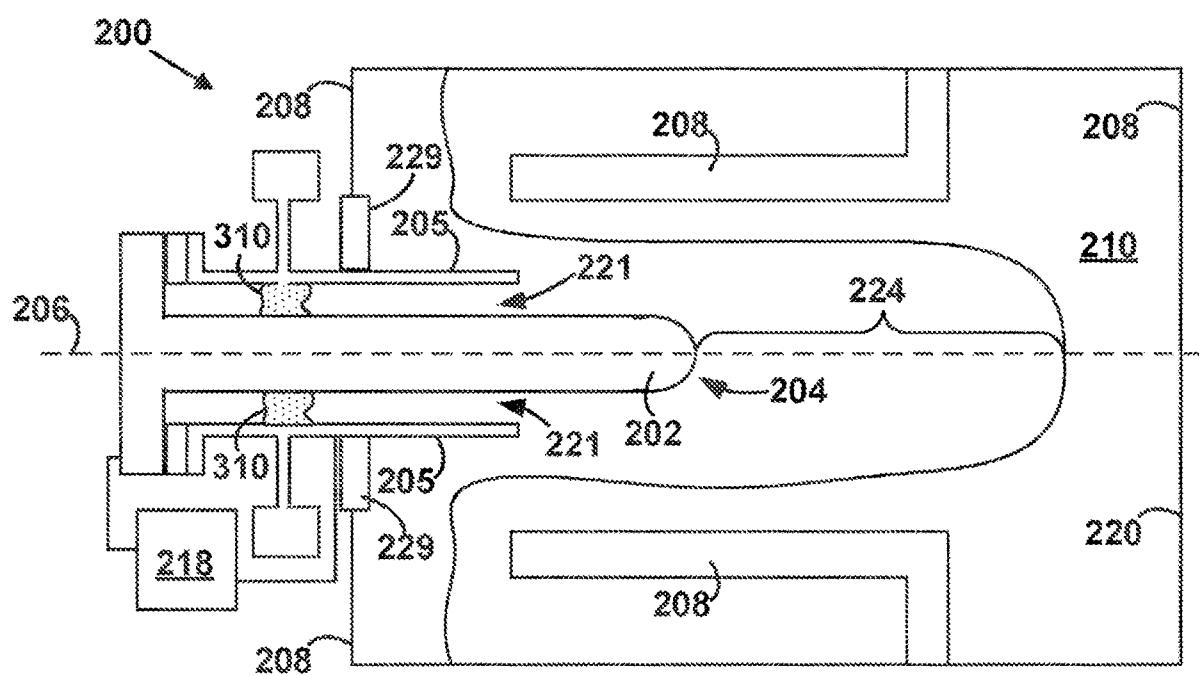


FIG. 12

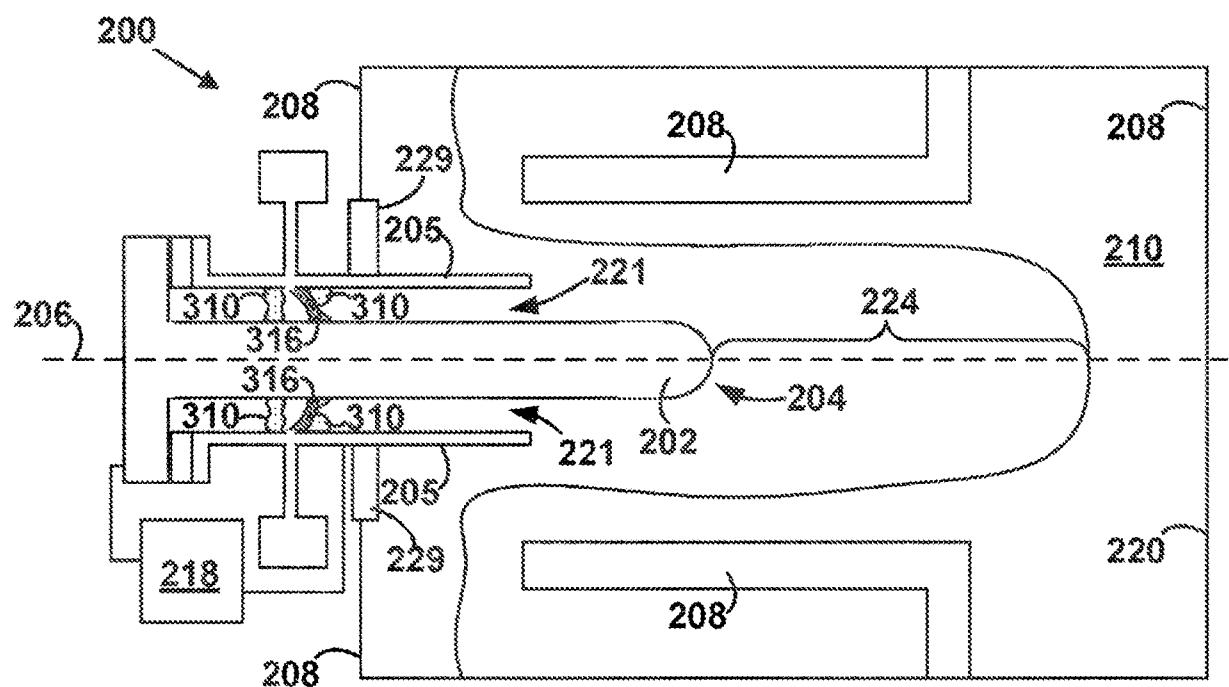


FIG. 13

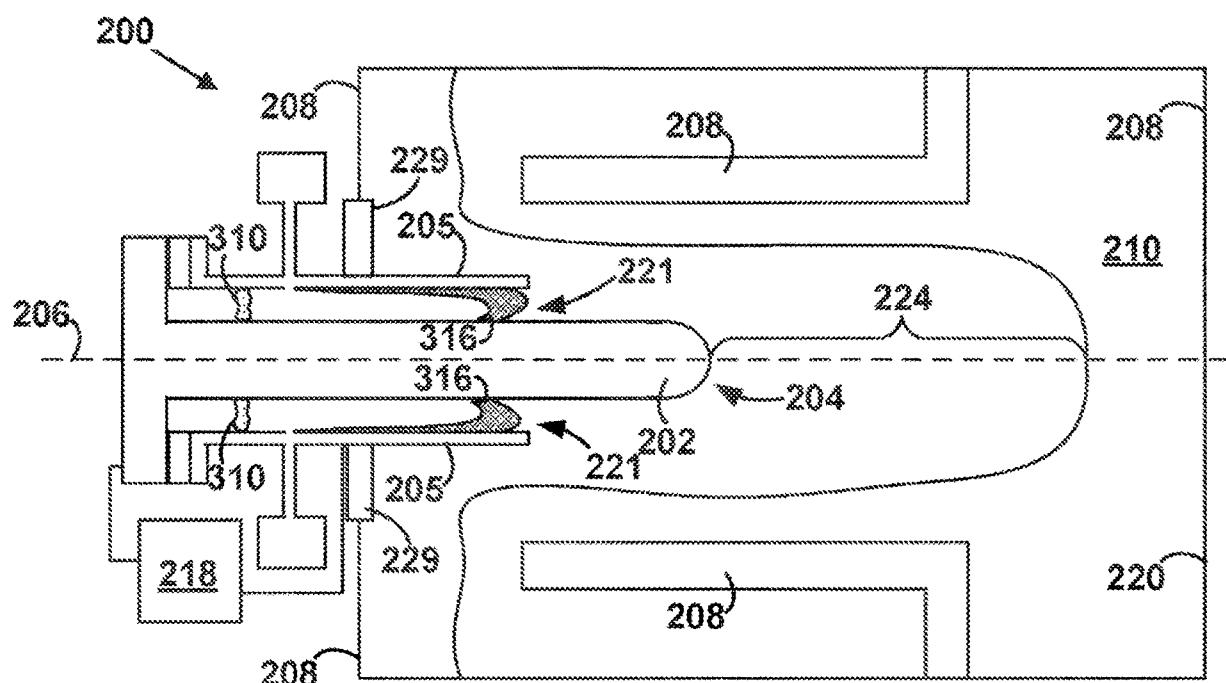


FIG. 14

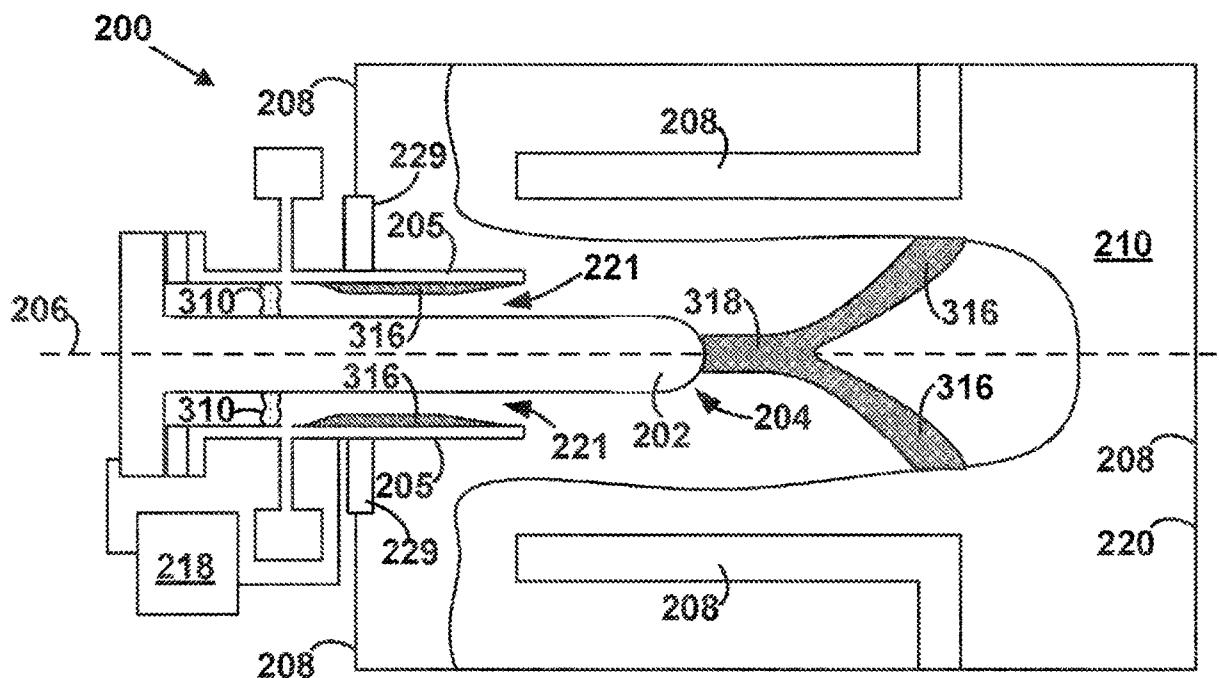


FIG. 15

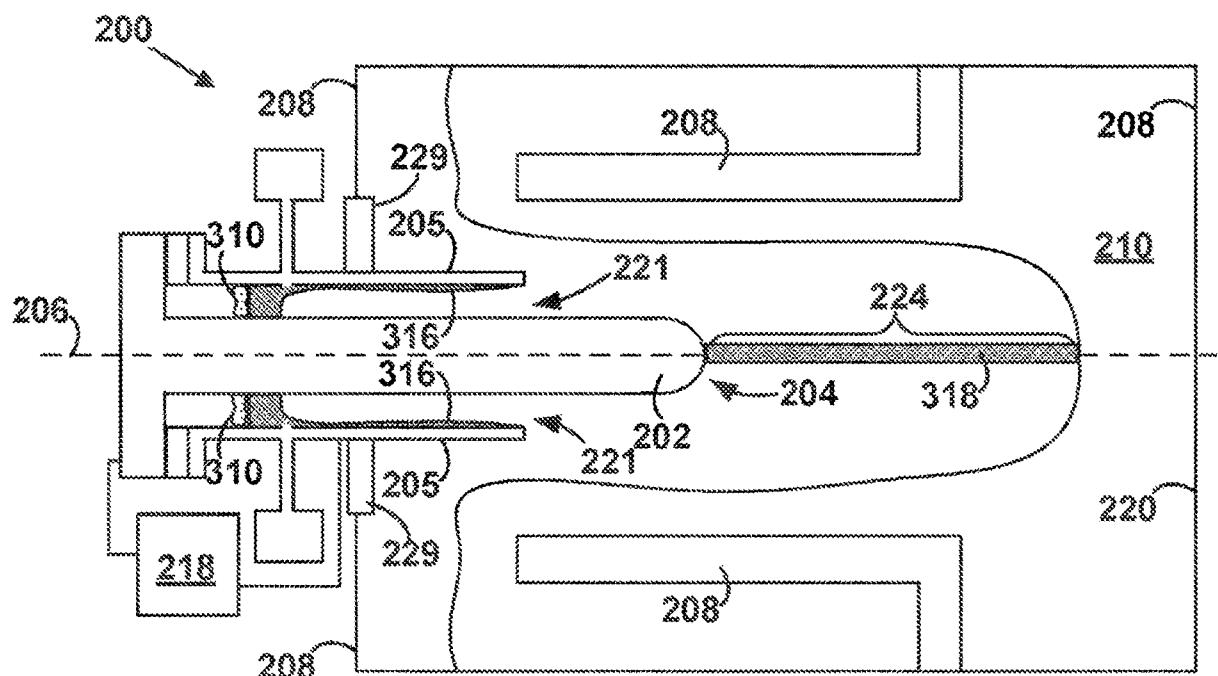


FIG. 16