

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 998 511**

51 Int. Cl.:

G21B 1/05 (2006.01)

G21B 1/11 (2006.01)

G21F 3/00 (2006.01)

H05K 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.06.2020 PCT/US2020/040069**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.01.2021 WO21007058**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2020 E 20743465 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.11.2024 EP 3997716**

54 Título: **Estructuras de blindaje en entorno de plasma**

30 Prioridad:

11.07.2019 US 201916509286

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.02.2025

73 Titular/es:

**LOCKHEED MARTIN CORPORATION (100.00%)
6801 Rockledge Drive
Bethesda, MD 20817-1877, US**

72 Inventor/es:

**HEINRICH, JONATHON, ROBERT;
GARRETT, MICHAEL, LANE;
MCGUIRE, THOMAS, JOHN y
FONT, GABRIEL, IVAN**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 998 511 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

Estructuras de blindaje en entorno de plasma

5 **Campo técnico**

Esta divulgación se refiere de manera general a confinamiento de plasma y, más particularmente, a estructuras de blindaje en entornos de plasma.

10 **Antecedentes**

La energía de fusión es energía que se genera mediante un procedimiento de fusión nuclear en el que dos o más núcleos atómicos colisionan a una velocidad muy alta y se unen para formar un nuevo tipo de núcleo atómico. Un reactor de fusión es un dispositivo que produce energía de fusión confinando y controlando plasma.

15 Determinados componentes de un reactor de fusión o un dispositivo de confinamiento de plasma pueden estar sumergidos en, o expuestos a, plasma. La exposición a plasma puede dañar o interferir de otro modo con el funcionamiento de componentes del reactor de fusión o dispositivo de confinamiento de plasma. Adicionalmente, la interferencia de componentes del dispositivo de confinamiento de plasma con el plasma o campos electromagnéticos dependientes del mismo puede reducir la eficiencia y/o estabilidad del confinamiento y/o control del plasma.

20 El documento US9959941B2 describe un reactor de fusión que incluye un cerramiento que tiene un primer extremo, un segundo extremo opuesto al primer extremo, y un punto central sustancialmente equidistante entre el primer y segundo extremos del cerramiento. El reactor de fusión incluye dos bobinas magnéticas internas suspendidas dentro del cerramiento y posicionadas en lados opuestos del punto central del cerramiento, una o más bobinas magnéticas de encapsulación posicionadas a cada lado del punto central del cerramiento, dos bobinas magnéticas de espejo posicionadas en lados opuestos del punto central del cerramiento, y una o más tallos de soporte para soportar las dos bobinas magnéticas internas suspendidas dentro del cerramiento. La una o más bobinas magnéticas de encapsulación y las dos bobinas magnéticas de espejo son coaxiales con las bobinas magnéticas internas. Las bobinas magnéticas pueden hacerse funcionar, cuando se les suministran corrientes eléctricas, para formar campos magnéticos para confinar plasma dentro del cerramiento.

25 El documento US 4436691A describe un método y aparato de inducción para formar plasma de tipo *spheromak* desprendido usando un anillo toroidal metálico de pared delgada, con cables conductores de corriente externos y bobinas de campo toroidales y poloidales internas ubicadas dentro de una cámara de vacío rellena con gas hidrógeno de baja densidad y una bobina de generación de campo axial externa. La presencia de una corriente en las bobinas de campo poloidales y un campo axial generado de manera externa establece la configuración de campo poloidal inicial en la que el campo es más intenso hacia el eje principal del toroide. Entonces se emiten impulsos a la bobina de generación de campo toroidal interna, ionizando el gas e induciendo corriente poloidal y campo magnético toroidal en la región de plasma en la funda exterior y adyacente al anillo y provocando que el plasma se expanda alejándose del anillo y hacia el eje principal. A continuación, se invierte la corriente en las bobinas de campo poloidal en el anillo. Esto induce corriente toroidal en el plasma y provoca que se reconecten las líneas de campo magnético poloidal. La reconexión continúa hasta que sustancialmente la totalidad del plasma está formado en una configuración de tipo *spheromak* independiente mantenida en equilibrio mediante el campo externo inicial.

45 **Sumario de la divulgación**

50 Obstáculos, tales como soportes, estructuras funcionales, equipos de diagnóstico, en plasma (por ejemplo, usado en fusión) pueden dar como resultado una acumulación significativa de iones y electrones en o cerca de estos obstáculos. Las pérdidas de plasma debidas a los obstáculos pueden modificar fuertemente la densidad y temperatura de plasma, lo cual normalmente no es deseable. Como resultado, se han requerido técnicas ópticas y de haces no perturbantes para medir parámetros de plasma para tener en cuenta tales interacciones complejas. Además, algunos diseños para sistemas de confinamiento usan técnicas de levitación complicadas y caras para crear geometrías de campo magnético de interés para fusión de beta alta con el fin de reducir el número de obstáculos dentro del plasma para evitar algunos de estos problemas. Adicionalmente, este problema evita una exploración realista de determinadas clases de conceptos de fusión magnética que requieren sumergir componentes, tales como bobinas electromagnéticas, en, o rodearlos de otro modo por, plasma. Por consiguiente, determinadas realizaciones abordan este problema blindando obstáculos en plasma usando conformación y protección de campo magnético.

60 Según una realización, un sistema de confinamiento de plasma incluye un cerramiento, una o más bobinas magnéticas internas, y uno o más soportes. La una o más bobinas magnéticas internas están suspendidas dentro del cerramiento en una región de plasma. El uno o más soportes soportan la una o más bobinas magnéticas internas suspendidas dentro del cerramiento. Cada soporte del uno o más soportes incluye un primer extremo, un segundo extremo opuesto al primer extremo, y material eléctricamente conductor. El primer extremo está acoplado a una porción interior del cerramiento. El segundo extremo está acoplado a un componente dispuesto dentro de la región de plasma. El material eléctricamente conductor está dispuesto entre el primer extremo y el segundo extremo. El material eléctricamente

conductor está configurado para, cuando se le suministran una o más corrientes eléctricas, generar un campo magnético que tiene un gradiente de campo magnético que varía a lo largo del soporte desde el primer extremo hasta el segundo extremo.

5 Según aún otra realización, un método incluye disponer una o más bobinas magnéticas internas suspendidas dentro de una región de plasma de un cerramiento. El método incluye además usar uno o más soportes para soportar la una o más bobinas magnéticas internas suspendidas dentro del cerramiento. El uno o más soportes están dispuestos al menos parcialmente dentro de la región de plasma. El método incluye además generar un campo magnético a lo largo de cada uno del uno o más soportes, teniendo el campo magnético un gradiente de campo magnético no nulo a lo largo de una longitud del soporte hacia y desde la bobina magnética interna soportada, el campo magnético generado usando una corriente suministrada a material eléctricamente conductor dispuesto dentro de cada uno del uno o más soportes.

15 Cada una de las realizaciones resumidas anteriormente puede tener una o más variaciones o características opcionales que pueden proporcionar una o más ventajas adicionales o diferentes. En el presente documento se dan a conocer ejemplos no limitativos de tales variaciones y/o características opcionales, pero variaciones y/o características adicionales pueden entenderse de manera adecuada a la luz de la divulgación, incluyendo la descripción detallada, reivindicaciones y dibujos adjuntos.

20 La presente divulgación puede proporcionar numerosas ventajas técnicas. Por ejemplo, determinadas realizaciones proporcionan un soporte para un componente sumergido en plasma que genera un campo magnético con un gradiente de campo magnético no nulo a lo largo de la longitud del soporte. De esta manera, el campo magnético puede superponerse con un campo magnético existente, reduciendo de ese modo la incidencia de plasma sobre el componente, el soporte o un cerramiento en el que está confinado el plasma. En otro ejemplo, determinadas realizaciones proporcionan material eléctricamente conductor dentro de un soporte que incluye devanados de material conductor que está configurado para crear un campo magnético con gradiente no nulo. De esta manera, los devanados pueden configurarse de una variedad de maneras para proporcionar el campo magnético que minimiza las pérdidas de plasma. Como aún otro ejemplo, determinadas realizaciones reducen adicionalmente las pérdidas de plasma para el soporte proporcionando providing una ranura a través de la cual puede pasar plasma. Aunque los campos magnéticos proporcionados del soporte pueden blindar el soporte, la ranura puede permitir que plasma que sigue determinadas líneas de campo magnético pase a través del soporte sin impactar contra el soporte.

35 Otras ventajas técnicas resultarán fácilmente evidentes para un experto en la técnica a partir de las siguientes figuras, descripciones y reivindicaciones. Además, aunque anteriormente se han mencionado ventajas específicas, diversas realizaciones pueden incluir todas, algunas o ninguna de las ventajas mencionadas.

Breve descripción de los dibujos

40 Para una comprensión más completa de la presente divulgación y sus ventajas, ahora se hace referencia a la siguiente descripción, tomada junto con los dibujos adjuntos, en los que:

las figuras 1A y 1B ilustran un sistema de confinamiento de plasma de ejemplo que tiene una bobina magnética interna en una región de plasma soportada por uno o más soportes, según determinadas realizaciones;

45 las figuras 2A y 2B ilustran un soporte de ejemplo configurado para generar un campo magnético para blindar frente a plasma, respectivamente, según determinadas realizaciones;

50 las figuras 3A-3D ilustran diversas configuraciones de ejemplo de soportes para bobinas magnéticas internas configuradas para generar campos magnéticos que tienen gradientes no nulos, según determinadas realizaciones;

la figura 4 ilustra un soporte de ejemplo que tiene material eléctricamente conductor en una configuración particular, según determinadas realizaciones;

55 las figuras 5A-C ilustran un soporte de ejemplo que define una ranura a través de la cual puede fluir plasma, según determinadas realizaciones;

la figura 6 ilustra un soporte de ejemplo con material eléctricamente conductor que tiene una pluralidad de devanados con diferentes áreas en sección transversal, según determinadas realizaciones; y

60 la figura 7 ilustra un diagrama de flujo de un método de ejemplo para estructuras de blindaje expuestas a plasma, según determinadas realizaciones.

Descripción detallada de la divulgación

65 Intentos anteriores por blindar o "proteger" objetos y otros obstáculos frente a plasma usando campos magnéticos se han recibido con escepticismo y controversia. Por ejemplo, intentos anteriores por usar campos magnéticos de dipolo

para blindar obstáculos en plasma han encontrado problemas sobre cómo implementar el blindaje de campo magnético en diferentes geometrías y a través de diversos entornos de plasma. Por consiguiente, se han contemplado diferentes esquemas para proteger y blindar componentes frente a plasma, incluyendo retirar componentes de regiones de plasma, por ejemplo mediante levitación de componentes internos y evitando sumergir componentes en regiones de plasma, limitando de ese modo las posibles configuraciones de sistemas de confinamiento de plasma.

Tal como se detalla en el presente documento, se proponen mejoras en el blindaje de campo magnético creando un campo magnético alrededor de una estructura de soporte, tal como un soporte para una bobina electromagnética dispuesta en una región de plasma, que tiene un gradiente no nulo a lo largo de la longitud del campo magnético. Como resultado, pueden minimizarse los impactos de plasma sobre componentes internos, incluyendo componentes distintos de la estructura de soporte, del dispositivo de confinamiento de plasma.

Para facilitar una mejor comprensión de la presente divulgación, se facilitan los siguientes ejemplos de determinadas realizaciones. No debe interpretarse que los siguientes ejemplos limiten o definan el alcance de la divulgación. Realizaciones de la presente divulgación y sus ventajas se entienden mejor haciendo referencia a las figuras 1 a 7, en las que se usan números similares para indicar partes similares y correspondientes.

El plasma puede confinarse con campos electromagnéticos y, si se calienta, puede hacerse que produzca energía neta mediante reacciones de fusión nuclear. Estos campos pueden crearse mediante electrodos y/o bobinas de campo magnético. Con frecuencia son externos a la cámara de confinamiento de plasma, pero algunas configuraciones requieren componentes internos compatibles con vacío. Estos electrodos y/o bobinas de campo magnético internos pueden requerir soporte mecánico y protección frente a la naturaleza peligrosa del entorno de plasma, sin perturbar gravemente el plasma.

Las figuras 1A y 1B ilustran un sistema de confinamiento de plasma 100 de ejemplo que tiene una bobina magnética interna 105 en una región de plasma 120 soportada por uno o más soportes 115, según determinadas realizaciones. El sistema de confinamiento de plasma 100 puede ser cualquier sistema que usa componentes, tales como una bobina magnética interna 105, que pueden estar expuestos a plasma y pueden requerir estructuras que soportan estos componentes, por ejemplo, soportes 115. Por ejemplo, el sistema de confinamiento de plasma 100 puede usar campos magnéticos generados usando la bobina magnética interna 105 y, opcionalmente, campos magnéticos generados mediante otras bobinas (por ejemplo, bobinas u otros imanes fuera o incorporados dentro del cerramiento 110) u otras bobinas coaxiales con la bobina magnética interna 105, para controlar y confinar plasma dentro de una región de plasma 120.

Los componentes internos a plasma anteriores se han soportado mediante cables, alimentadores aislados o se han hecho levitar mediante campos magnéticos externos. Cada uno de estos enfoques plantea problemas. Los cables pueden proporcionar soporte estructural, pero no proporcionan ningún aislamiento frente al plasma. Los cables también pueden perturbar el entorno de plasma dado que el flujo alrededor de los cables puede no ser suave, y las superficies de cable con frecuencia son rugosas. Habitualmente los alimentadores aislados solo proporcionan un servicio, tal como energía, enfriamiento o diagnóstico, y pueden estar realizados de materiales cerámicos. Los materiales cerámicos son quebradizos y pueden proporcionar poco soporte. Además, una superficie cerámica puede presentar carga eléctrica a medida que el plasma deposita carga sobre la superficie que puede perturbar el entorno de plasma. La levitación externa es un enfoque excesivamente complejo y no puede mantenerse de manera indefinida. Por tanto, la levitación externa es una solución inadecuada para mantener un funcionamiento en estado estacionario, que puede ser deseable para hacer funcionar un reactor de fusión. Algunas realizaciones de la presente divulgación pueden abordar estas y otras deficiencias de enfoques existentes usando uno o más tallos de soporte, tales como los soportes 115, para proporcionar protección frente al entorno de plasma además de soporte metálico y en servicio de líneas eléctricas, de diagnóstico y de enfriamiento, de una manera diseñada para minimizar efectos perjudiciales sobre el confinamiento de plasma.

En general, el soporte 115 puede proporcionar soporte mecánico para la bobina magnética interna 105 del sistema de confinamiento de plasma 100. La bobina magnética interna 105 puede requerir mecanismos de soporte especiales al menos en parte porque pueden sumergirse en plasma, por ejemplo en la región de plasma 120. En algunas realizaciones, uno o más soportes 115 pueden soportar mecánicamente las bobinas magnéticas internas 105 y poder resistir un contacto mantenido con el entorno de plasma sin perturbar o minimizando la perturbación al entorno de plasma. En algunas realizaciones, los soportes 115 pueden incluir una cavidad interna a través de la cual cualquier componente adecuado puede extenderse al interior de la bobina magnética interna 105. Por ejemplo, componentes usados para suministrar electricidad para generar campos magnéticos con la bobina magnética interna 105 o componentes usados para enfriar o proporcionar diagnóstico dentro de la bobina magnética interna 105 pueden extenderse a través del interior de los soportes 115.

La figura 1A ilustra tres soportes 115 que soportan la bobina magnética interna 105 dentro del sistema de confinamiento de plasma 100, según determinadas realizaciones. Aunque la figura 1A ilustra un trío de soportes 115, la presente divulgación contempla que puede usarse cualquier número adecuado de soportes 115 para soportar la bobina magnética interna 105 o cada bobina magnética interna 105 que puede disponerse dentro de la región de plasma 120. Por ejemplo, en algunas realizaciones cada bobina magnética interna 105 puede estar soportada por uno

o dos soportes 115. La presente divulgación contempla que el uno o más soportes 115 pueden tener cualquier forma adecuada. Por ejemplo, los soportes 115 pueden tener secciones transversales elipsoides o circulares.

En algunas realizaciones, los soportes 115 pueden estar acoplados, cada uno, a un cerramiento 110 en un primer extremo 116 del soporte 115 y a la bobina magnética interna 105 en un segundo extremo 117. La presente divulgación contempla que el soporte 115 puede estar acoplado a la bobina magnética interna 105 y al cerramiento 110 de cualquier manera adecuada. Como un ejemplo, el soporte 115 puede estar soldado a la bobina magnética interna 105 y al cerramiento 110. Como otro ejemplo, el soporte 115 puede estar acoplado a la bobina magnética interna 105 y al cerramiento 110 usando cualquier número adecuado de cualquier elemento de sujeción adecuado. La presente divulgación contempla el uso de cualquier combinación adecuada de materiales para acoplar el soporte 115 a la bobina magnética interna 105 y al cerramiento 110. En algunas realizaciones, el uno o más soportes 115 pueden ser modulares, lo cual puede permitir ventajosamente una sustitución y/o mantenimiento más fáciles de los soportes 115.

En algunas realizaciones, el soporte 115 puede proporcionar soporte mecánico para suspender la bobina magnética interna 105 en la región de plasma 120. En algunas realizaciones, el soporte 115 puede estar colocado en tensión o compresión. El soporte 115 puede estar formado a partir de cualquier material adecuado o combinación de materiales. Como un ejemplo, el soporte 115 puede estar formado a partir de acero inoxidable o tungsteno. Como otro ejemplo, el soporte 115 puede estar formado a partir de aluminio recubierto con tungsteno. El uno o más materiales usados para formar el soporte 115 pueden variar según aplicaciones particulares del soporte 115 dentro del sistema de confinamiento de plasma 100. Como un ejemplo, en algunas realizaciones, bobina magnética interna 105 puede pesar sustancialmente más que en otras realizaciones, necesitando posiblemente el uso de un material más adecuado para soportar una bobina magnética interna 105 más pesada.

El soporte 115 puede estar ubicado en cualquier zona adecuada del cerramiento 110. En algunas realizaciones, el soporte 115 puede estar sumergido o parcialmente sumergido en la región de plasma 120. En algunas realizaciones, el soporte 115 puede estar ubicado en el sistema de confinamiento de plasma 100 en una zona en la que la concentración de plasma en la región de plasma 120 es la más débil, tal como en una zona de recirculación, por ejemplo, en la que el plasma circula alrededor de la bobina magnética interna 105 y/o entre la bobina magnética interna 105 y otra bobina magnética dentro de la región de plasma 120. El soporte 115 puede estar adaptado para resistir la exposición a plasma dentro del cerramiento 110 sin tener un efecto perjudicial sobre el confinamiento o control de plasma.

Tal como se comentó anteriormente, los soportes 115 pueden tener cualquier forma adecuada. En algunas realizaciones, el soporte 115 puede tener una forma en sección transversal de un elipsoide. En algunas realizaciones, la forma elipsoide puede permitir que el plasma fluya suavemente alrededor del soporte 115, lo cual puede prevenir ventajosamente los efectos perjudiciales sobre el confinamiento de plasma mediante el soporte 115. En algunas realizaciones, la sección transversal del soporte 115 es más delgada en una dirección ortogonal al campo magnético. Orientar el soporte 115 de tal manera puede dar ventajosamente como resultado un flujo de plasma reducido hasta la superficie, al tiempo que todavía se proporciona rigidez. En algunas realizaciones, la superficie del soporte 115 puede estar recubierta para proporcionar resistencia al bombardeo catódico con respecto al plasma que impacta.

Un ejemplo de un sistema de confinamiento de plasma en el que una o más bobinas magnéticas internas, tales como la bobina magnética interna 105, están dispuestas dentro de una región de plasma, por ejemplo la región de plasma 120, se proporciona en la patente estadounidense n.º 9.959.941 expedida el 1 de mayo de 2018.

Aunque determinadas realizaciones y ejemplos dados a conocer en el presente documento pueden hacer referencia a un sistema de confinamiento de plasma particular, determinadas técnicas y aparatos dados a conocer en el presente documento pueden implementarse en cualquier sistema de confinamiento adecuado en el que haya componentes dispuestos en una región de plasma y requieran algún soporte mecánico.

Las figuras 2A y 2B ilustran un soporte 215 de ejemplo configurado para generar un campo magnético "B" para blindar frente al plasma, respectivamente, según determinadas realizaciones. La figura 2A ilustra un soporte 215 de ejemplo que está configurado para tener corrientes 225a y 225b que fluyen a través del soporte 215. Tal como se muestra en este ejemplo particular, las corrientes 225a y 225b fluyen en sentidos opuestos, por ejemplo, desde el cerramiento 110 hasta la bobina magnética interna 105 y desde la bobina magnética interna 105 hasta el cerramiento 110. Cada corriente 225a y 225b genera un campo magnético, que, debido al principio de superposición, genera un único campo magnético combinado designado mediante el símbolo B. Tal como se muestra en la figura 2A, el campo magnético B está generalmente orientado hacia dentro de la página entre las corrientes 225a y 225b en el soporte 215 y hacia fuera de la página fuera de las corrientes 225a y 225b y fuera del soporte 115.

En algunas realizaciones, las corrientes 225a y 225b pueden transportarse por material eléctricamente conductor dispuesto dentro del soporte 215. Por ejemplo, el soporte 215 puede incluir uno o más alambres u otra deposición de material que está configurado para conducir electricidad. En algunas realizaciones, las corrientes 225a y 225b se transportan por primeras porciones y segundas porciones de material eléctricamente conductor, respectivamente. Por ejemplo, la corriente 225a puede transportarse por primeras porciones de material eléctricamente conductor dispuesto dentro del soporte 215 y la corriente 225b puede transportarse por segundas porciones de material eléctricamente

conductor dispuesto dentro del soporte 215. En algunas realizaciones, la primera y segunda porciones pueden estar acopladas entre sí como diferentes porciones de un cable enrollado que tiene uno o más devanados. Por ejemplo, las primeras porciones pueden ser las porciones de los devanados que transportan corriente en un primer sentido desde el cerramiento 110 hasta la bobina magnética interna 105, y las segundas porciones pueden ser las porciones de los devanados que transportan corriente en un segundo sentido desde la bobina magnética interna 105 hasta el cerramiento 110. En el presente documento se contempla cualquier configuración adecuada de material conductor que puede transportar corriente dentro del soporte 215.

La figura 2B ilustra una vista en sección transversal del soporte 215. Las corrientes 225a y 225b están orientadas a lo largo de la longitud del soporte 215 y hacia dentro y hacia fuera de la página, respectivamente. La figura 2B ilustra líneas de campo magnético 230 de ejemplo en el plano en sección transversal ilustrado que pueden resultar del par de corrientes 225a y 225b. Tal como se muestra, las líneas de campo 230 pueden ser abiertas o cerradas. Por ejemplo, las líneas de campo magnético 230 más cerca de las corrientes 225a y 225b son bucles más estrechos y cerrados. Sin embargo, a una determinada distancia desde un punto central entre las corrientes 225a y 225b, las líneas de campo 230 están más separadas y ya no forman bucles cerrados. El límite 235 entre las líneas de campo magnético 230 cerradas y abiertas puede denominarse límite de flujo o magnetosfera. El límite 235 puede definirse mediante uno o más parámetros, incluyendo un radio "r" que define la distancia entre un punto central entre las corrientes 225a y 225b y el punto de transición entre líneas de campo magnético 230 abiertas y cerradas. El radio "r" puede variar según la configuración particular de las corrientes 225a y 225b. Generalmente, el radio "r" puede ser más grande si se proporcionan corrientes más grandes a través del soporte 215. Tal como se detalla adicionalmente en el presente documento, el límite 235 y su radio de magnetosfera "r" asociado puede estar configurado para variar a lo largo de la longitud de soporte 215.

En determinadas realizaciones, los campos magnéticos mostrados en el ejemplo de las figuras 2A y 2B pueden generarse sin hacer fluir una o más corrientes a través del soporte 215. Por ejemplo, en algunas realizaciones, los campos magnéticos pueden generarse usando una combinación de imanes permanentes. El uso de imanes permanentes puede reducir la necesidad de proporcionar corrientes y material eléctricamente conductor dentro del soporte 215. Sin embargo, el uso de imanes permanentes puede limitar las geometrías de campos magnéticos que pueden realizarse y/o la disponibilidad de determinados niveles de intensidades de campo magnético.

Las figuras 3A-D ilustran diversas configuraciones de ejemplo del soporte 215 que generan campos magnéticos que tienen gradientes no nulos, según determinadas realizaciones. Tal como se mencionó anteriormente, el límite 235 y su radio de magnetosfera "r" asociado pueden estar configurados para variar a lo largo de la longitud del soporte 215. La variación del radio de magnetosfera "r" puede tener varios beneficios. Por ejemplo, dependiendo de la configuración del dispositivo de confinamiento de plasma 100 y sus componentes constituyentes, tales como la bobina magnética interna 105, el plasma dentro de la región de plasma 120 puede someterse a una presión de plasma, por ejemplo, al controlar/confinar el campo magnético el plasma, lo cual provoca que el plasma impacte en la bobina magnética interna 105 y/o el cerramiento 110 con mayor incidencia. Por consiguiente, el campo magnético generado por los soportes 215 puede estar configurado para contrarrestar parte de la "deriva" experimentada por el plasma y reducir de ese modo las pérdidas de plasma para la bobina magnética interna 105 y/o el cerramiento 110. En particular, el campo magnético del soporte 215 puede estar superpuesto sobre el campo magnético de sistema de confinamiento de plasma 100 para dar como resultado una región de plasma 120 más estable.

La variación del campo magnético a lo largo del soporte 215 puede representarse mediante un radio de magnetosfera "r" variable a lo largo del soporte 215 entre la bobina magnética interna 105 y el cerramiento 110. La figura 3A ilustra una configuración del soporte 215 en la que el radio de magnetosfera "r" varía a lo largo del soporte 215 y de ese modo proporciona un campo magnético con un gradiente no nulo, por ejemplo, $\nabla B \neq 0$ a lo largo del soporte 215. En particular, la figura 3A ilustra una configuración del soporte 215, por ejemplo, mediante una configuración particular de las corrientes dentro del soporte 215, de tal manera que los campos magnéticos resultantes tienen radios de magnetosfera r_a , r_b y r_c . En este ejemplo particular, r_a es mayor que r_b y r_c es mayor que r_b . Como resultado, el radio de magnetosfera "r" disminuye y después aumenta a lo largo de la longitud del soporte 215.

Según otra realización, la figura 3B ilustra una configuración del soporte 215 que tiene radios de magnetosfera r_d , r_e y r_f . En esta configuración particular, r_d es menor que r_e y r_f es menor que r_e . Por consiguiente, el radio de magnetosfera "r" aumenta y después disminuye a lo largo de la longitud del soporte 215.

Según otra realización, la figura 3C ilustra una configuración del soporte 215 que tiene radios de magnetosfera r_g , r_h y r_i . En este ejemplo, el radio de magnetosfera "r" solo disminuye desde el cerramiento 110 hasta la bobina magnética interna 105. Según otra realización, la figura 3D ilustra una configuración del soporte 215 que tiene radios de magnetosfera r_j , r_k y r_l . En este ejemplo, el radio de magnetosfera "r" solo aumenta desde el cerramiento 110 hasta la bobina magnética interna 105. En algunas realizaciones, la disminución/aumento del radio de magnetosfera a lo largo de la longitud del soporte 215 puede ser uniforme, lineal, no lineal, escalonado o cualquier otra variación adecuada.

Aunque las figuras 3A-D proporcionan configuraciones de ejemplo particulares del soporte 215 en las que el radio de magnetosfera "r" varía a lo largo de la longitud del soporte 215, en el presente documento se contempla cualquier otra configuración adecuada que pueda reducir las pérdidas de plasma. Por ejemplo, diferentes configuraciones de sistema

de confinamiento de plasma 100 pueden justificar diferentes configuraciones de campo magnético del soporte 215 para reducir las pérdidas de plasma. Como otro ejemplo, los soportes para diferentes bobinas en el sistema de confinamiento de plasma 100 pueden someterse a diferente topología de campo magnético, requiriendo diferentes campos magnéticos superpuestos a partir del soporte 215. Por consiguiente, cualquier configuración adecuada del soporte 215 que genera un campo magnético con un gradiente no nulo a lo largo del soporte 215 se contempla en el presente documento y a la luz del entendimiento de un experto habitual en la técnica.

La figura 4 ilustra un soporte 415 de ejemplo que tiene material eléctricamente conductor 425 en una configuración particular. El soporte 415 puede tener dispuesto en el interior material eléctricamente conductor 425 que tiene uno o más bucles o devanados, tal como se muestra en el ejemplo ilustrado de la figura 4. En algunas realizaciones, el material eléctricamente conductor 425 incluye uno o más devanados de un alambre de metal o bobina que está configurado para conducir corriente dentro del soporte 415. En determinadas realizaciones, el material eléctricamente conductor 425 está dispuesto dentro del soporte 415 de tal manera que se produce un campo magnético con un gradiente no nulo cuando una o más corrientes fluyen a través del material eléctricamente conductor 425. Por ejemplo, las distancias d_1 , d_2 y d_3 entre las porciones de material eléctricamente conductor 425 en las que fluye corriente en sentidos opuestos pueden variar a lo largo de la longitud del soporte 415. En particular, porciones opuestas del material eléctricamente conductor 425 pueden estar alejadas una primera distancia d_1 próximas a la bobina magnética interna 105, alejadas una segunda distancia d_2 cerca de una parte central del soporte 415 y alejadas una tercera distancia d_3 próxima del cerramiento 110.

Los valores relativos de d_1 , d_2 y d_3 pueden elegirse basándose en la variación deseada del campo magnético (por ejemplo, el perfil del gradiente del campo magnético) a lo largo del soporte 415. Específicamente, la configuración del material eléctricamente conductor 425 dentro del soporte 415 puede elegirse basándose en la configuración particular del campo magnético. En el ejemplo ilustrado de la figura 4, d_1 es menor que d_2 y d_2 es mayor que d_3 . Por consiguiente, el radio de magnetosfera r_1 correspondiente es mayor que r_2 , y r_2 es menor que r_3 .

En el ejemplo anterior, el radio de magnetosfera efectivo para el soporte 415 disminuye y después aumenta a lo largo de la longitud de soporte 415 basándose en la variación de la distancia entre porciones del material eléctricamente conductor 425 dentro del soporte 415. Esto representa únicamente una configuración de este tipo, y se contemplan expresamente variaciones de la configuración del material eléctricamente conductor 425 dentro del soporte 415 para cualquier campo magnético que tenga un gradiente no nulo a lo largo de la longitud del soporte 415, incluyendo las configuraciones mostradas en las figuras 3A-D y cualquier otra que puedan reconocer los expertos habituales en la técnica.

Las figuras 5A-C ilustran un soporte 515 de ejemplo que define una ranura 540 a través de la cual puede fluir plasma, según determinadas realizaciones. El soporte 515 puede incluir material eléctricamente conductor 525 en el que puede fluir corriente para producir un campo magnético que blindo el soporte 515. El material eléctricamente conductor 525 puede tener cualquier configuración adecuada, incluyendo configuraciones comentadas anteriormente que producen campos magnéticos que tienen un gradiente no nulo a lo largo de la longitud del soporte 515. Adicionalmente, el soporte 515 define una ranura 540 en la que no está presente el material que constituye el soporte 515 y el material eléctricamente conductor 525.

Aunque el campo magnético generado por el soporte 515 puede tener un efecto de blindaje, por ejemplo, basándose en el límite efectivo definido por el radio de magnetosfera, el campo magnético producido todavía puede permitir que fluya plasma hacia el soporte 515 e impacte contra el mismo. Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 5C, hay una o más líneas de campo magnético 530 que comienzan fuera del límite de magnetosfera 535, entran dentro del límite 535, y salen de nuevo fuera del límite 535. El plasma puede desplazarse a lo largo de las líneas de campo magnético 530 y, por tanto, puede no excluirse completamente de la región dentro del límite 535. Como resultado, el plasma puede intentar seguir una línea de campo magnético que conduce el plasma para que impacte contra una porción del soporte 515.

En determinadas realizaciones, el soporte 515 define la ranura 540 de tal manera que la orientación de la ranura 540 coincide con la orientación de las líneas de campo magnético entre las porciones opuestas del material eléctricamente conductor 525. Por ejemplo, la ranura 540 puede definirse para tener una axial dirección que es la misma que la línea de campo magnético. Tal como se muestra en la figura 5B, la ranura 540 puede estar orientada en la dirección de flujo de plasma. De esta manera, el plasma que no se redirige mediante los campos magnéticos de blindaje del soporte 515 puede fluir a través de la ranura 540 en lugar de impactar contra el soporte 515.

El tamaño y la forma de la ranura 540 pueden definirse para minimizar impactos de plasma contra el soporte 515. Por ejemplo, el tamaño de la ranura 540 puede maximizarse dada la resistencia mecánica necesaria del soporte 515 y/o el espacio requerido y configuración del material eléctricamente conductor dentro del soporte 515. Por ejemplo, si se usa la configuración de arrollamiento, tal como se ilustra en las figuras 5A-5C, entonces la ranura 540 puede definirse en la porción central del soporte 515 donde no hay ningún material eléctricamente conductor 525. En algunas realizaciones, la ranura 540 puede ser un orificio alargado y, en una realización específica, la ranura 540 puede tener una forma ovalada o circular.

Aunque la ranura 540 se proporciona en el soporte 515 de ejemplo, la ranura 540 o cualquier recorte u orificio similar puede usarse junto con cualquier configuración o características de los soportes 215, 415, 515, 615 dados a conocer en el presente documento.

5 La figura 6 ilustra un soporte 615 de ejemplo con material eléctricamente conductor 625 que tiene una pluralidad de devanados con diferentes áreas en sección transversal, según determinadas realizaciones. Dicho de otro modo, el soporte 615 puede incluir material eléctricamente conductor 625 que soporta concentraciones variables de corriente eléctrica a lo largo de la longitud del soporte 615. A diferencia de las realizaciones comentadas en relación con la figura 4, no es necesario que varíe la distancia entre porciones del material eléctricamente conductor 625 que transportan corriente en sentidos opuestos. Tal como se muestra en el ejemplo ilustrado, puede lograrse un radio de magnetosfera variable proporcionando devanados que empiezan y terminan en diferentes ubicaciones. Dicho de otro modo, las áreas de los devanados pueden variar.

15 Tal como se muestra en el ejemplo en la figura 6, los devanados del material eléctricamente conductor 625a pueden formar un bucle alrededor del interior del soporte 615 próximos a la bobina magnética interna 105, creando de ese modo una región dentro del soporte 615 que tiene una concentración de corriente superior y, por tanto, generar un campo magnético que tiene un radio de magnetosfera más grande. Asimismo, los devanados del material eléctricamente conductor 625c pueden formar un bucle alrededor del interior del soporte 615 próximos al cerramiento 110, creando de ese modo una región dentro del soporte 615 que tiene una concentración de corriente superior y, por tanto, generar un campo magnético que tiene un radio de magnetosfera más grande. En cambio, los devanados del material eléctricamente conductor 625b cerca de la parte central del soporte 615 pueden tener un área más grande y, por tanto, tener una concentración de corriente inferior. Por consiguiente, el radio de magnetosfera cerca de la parte central del soporte 615 puede ser menor que los radios en los extremos del soporte 615. De esta manera, puede generarse un campo magnético con el material eléctricamente conductor 625 dentro del soporte 615 que varía a lo largo de la longitud del soporte 615 y tiene un gradiente no nulo.

La figura 6 ilustra tan solo una única configuración de ejemplo del material eléctricamente conductor 625 que tiene devanados con diferentes áreas y/o diferentes concentraciones dentro del soporte 615. En el presente documento se contempla cualquier configuración adecuada haciendo variar la colocación de los devanados del material eléctricamente conductor 625. Por ejemplo, pueden usarse configuraciones del material eléctricamente conductor 625 con devanados de diferentes áreas en sección transversal para crear cualquier campo magnético adecuado que varía a lo largo de la longitud del soporte 615 y tiene un gradiente no nulo a lo largo de esa dirección. En particular, el material eléctricamente conductor 625 puede estar configurado para crear las configuraciones de radios de magnetosfera mostradas en las figuras 3A-D o cualquier otra configuración que pueda usarse dentro del sistema de confinamiento de plasma 100 para reducir las pérdidas de plasma.

La figura 7 ilustra un diagrama de flujo de un método 700 de ejemplo para estructuras de blindaje expuestas a plasma, según determinadas realizaciones. Por ejemplo, el método 700 puede implementarse en un sistema de confinamiento de plasma, tal como el sistema de confinamiento de plasma 100, en el que uno o más componentes dispuestos o sumergidos en plasma necesitan soporte mecánico. El método 700 puede comenzar en la etapa 710 en la que una o más bobinas magnéticas internas, tales como la bobina magnética interna 105, están suspendidas dentro de una región de plasma de un cerramiento. Por ejemplo, puede usarse una bobina magnética interna en un sistema de confinamiento de plasma para generar campos magnéticos para controlar y/o confinar plasma, por ejemplo, para generar energía usando procedimientos de fusión. Las bobinas magnéticas internas pueden estar ventajosamente dispuestas dentro de una región dentro del sistema de tal manera que las bobinas magnéticas internas están expuestas a plasma, por ejemplo, dentro de una región del cerramiento en la que el plasma está fluyendo o está presente de otro modo durante el funcionamiento del sistema. Las bobinas pueden requerir soporte mecánico para mantener su posición y su ubicación lejos de componentes no blindados u otros componentes del sistema de confinamiento de plasma que no están diseñados para sumergirse en plasma.

En la etapa 520, se usan uno o más soportes para soportar la una o más bobinas magnéticas internas suspendidas dentro del cerramiento. El uno o más soportes pueden estar dispuestos al menos parcialmente dentro de la región de plasma. Por ejemplo, si las bobinas magnéticas internas están completamente sumergidas en la región de plasma, entonces los soportes pueden estar acoplados a las bobinas magnéticas internas dentro de la región de plasma. Esto puede someter los soportes a posibles impactos del plasma dentro de la región de plasma como compensación por soportar la colocación de las bobinas magnéticas internas dentro de la región de plasma.

En la etapa 730, puede generarse un campo magnético a lo largo de cada uno del uno o más soportes. El campo magnético generado puede blindar o "proteger" los soportes frente a plasma incidente. Por ejemplo, el campo magnético generado puede modificar la topología de campo magnético de fondo para modificar las de campo magnético próximas a los soportes. Esto puede incluir crear líneas de campo magnético que se extienden alrededor de los soportes en lugar de tener una trayectoria que interseca con una porción del soporte. En determinadas realizaciones, el campo magnético generado varía a lo largo del soporte a lo largo de una longitud del soporte hacia y desde la bobina magnética interna soportada usando una corriente suministrada al material eléctricamente conductor dispuesto dentro de cada uno del uno o más soportes. En particular, el material eléctricamente conductor puede estar configurado de una manera particular dentro del soporte de tal manera que, cuando se le suministra electricidad, el

campo magnético resultante tiene un gradiente no nulo en la dirección a lo largo de la longitud del soporte. Dicho de otro modo, el radio de magnetosfera efectivo del campo magnético generado en el soporte puede variar a lo largo de su longitud, tal como se muestra en los soportes 215, 315, 515 y 615 de ejemplo. De esta manera, el soporte puede generar un campo magnético que reduce las pérdidas de plasma.

5 Pueden realizarse modificaciones, adiciones u omisiones al método 700 representado en la figura 7. Cualquier etapa puede realizarse en paralelo o en cualquier orden adecuado. Además, el método 700 puede incluir más, menos u otras etapas. Adicionalmente, una o más de las etapas del método 700, o realizaciones del mismo, pueden realizarse mediante cualquier componente adecuado o combinación de componentes del sistema de confinamiento de plasma 100 o los soportes 115, 215, 415, 515 y/o 615.

15 La presente divulgación puede proporcionar numerosas ventajas, tales como las diversas ventajas técnicas que se han descrito con respecto a diversas realizaciones y ejemplos dados a conocer en el presente documento. Otras ventajas técnicas resultarán fácilmente evidentes para un experto en la técnica a partir de las siguientes figuras, descripciones y reivindicaciones. Además, aunque se han mencionado ventajas específicas en esta divulgación, diversas realizaciones pueden incluir todas, algunas o ninguna de las ventajas mencionadas.

20 El alcance de esta divulgación abarca todos los cambios, sustituciones, variaciones, alteraciones y modificaciones de las realizaciones de ejemplo descritas o ilustradas en el presente documento que entenderá un experto habitual en la técnica. El alcance de esta divulgación no está limitado a las realizaciones de ejemplo descritas o ilustradas en el presente documento. Además, aunque esta divulgación describe e ilustra realizaciones respectivas en el presente documento como que incluyen componentes, elementos, funciones, operaciones o etapas particulares, cualquiera de estas realizaciones puede incluir cualquier combinación o permutación de cualquiera de los componentes, elementos, funciones, operaciones o etapas descritos o ilustrados en cualquier parte en el presente documento que entenderá un 25 experto habitual en la técnica.

Además, la referencia en las reivindicaciones adjuntas a un aparato o sistema o un componente de un aparato o sistema que está adaptado a, dispuesto para, que puede, configurado para, habilitado para, que puede hacerse funcionar para, u operativo para, realizar una función particular, abarca ese aparato, sistema, componente, ya esté o 30 no el mismo o esa función particular activado, encendido o desbloqueado, siempre que ese aparato, sistema o componente esté adaptado, dispuesto, tenga esa capacidad, esté configurado, habilitado, pueda hacerse funcionar o sea operativo de ese modo.

35 Aunque la presente divulgación se ha descrito con varias realizaciones, al experto en la técnica se le pueden ocurrir una miríada de cambios, variaciones, alteraciones, transformaciones y modificaciones, y se pretende que la presente divulgación abarque tales cambios, variaciones, alteraciones, transformaciones y modificaciones que se encuentren dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de confinamiento de plasma (100), que comprende un cerramiento (110);
- 5 una o más bobinas magnéticas internas (105) suspendidas dentro del cerramiento (110) en una región de plasma (120); y
- 10 uno o más soportes (115) configurados para soportar la una o más bobinas magnéticas internas (105) suspendidas dentro del cerramiento (110), en el que cada soporte (115) del uno o más soportes (115) comprende:
- 15 un primer extremo (116) acoplado a una porción interior del cerramiento (110);
- un segundo extremo (117) opuesto al primer extremo (116), estando el segundo extremo (117) acoplado a un componente dispuesto dentro de la región de plasma (120); y
- 20 material eléctricamente conductor dispuesto entre el primer extremo y el segundo extremo, caracterizado porque el material eléctricamente conductor está configurado para, cuando se le suministran una o más corrientes eléctricas (225a, 225b), generar un campo magnético que tiene un gradiente de campo magnético que varía a lo largo del soporte (115) desde el primer extremo (116) hasta el segundo extremo (117).
- 25 2. Sistema de confinamiento de plasma (100) según la reivindicación 1, en el que el material eléctricamente conductor comprende una o más primeras porciones de material eléctricamente conductor y una o más segundas porciones de material eléctricamente conductor, en el que el material eléctricamente conductor está configurado para conducir corriente en un primer sentido en la una o más primeras porciones y en un segundo sentido opuesto al primer sentido en la una o más segundas porciones.
- 30 3. Sistema de confinamiento de plasma (100) según la reivindicación 2, en el que la distancia entre la una o más primeras porciones y la una o más segundas porciones varía a lo largo del soporte (115) entre el primer extremo (116) y el segundo extremo (117).
- 35 4. Sistema de confinamiento de plasma (100) según la reivindicación 1, en el que el material eléctricamente conductor comprende una bobina de material eléctricamente conductor que tiene una pluralidad de devanados.
- 40 5. Sistema de confinamiento de plasma (100) según la reivindicación 4, en el que la pluralidad de devanados definen una única área en sección transversal o más de un área en sección transversal.
6. Sistema de confinamiento de plasma (100) según la reivindicación 1, en el que cada uno del uno o más soportes (115) define un orificio alargado que tiene una dirección axial que coincide con una dirección de flujo de plasma dentro de la región de plasma (120).
- 45 7. Método, que comprende,
- 50 disponer una o más bobinas magnéticas internas (105) suspendidas dentro de una región de plasma (120) de un cerramiento (110);
- usar uno o más soportes (115) para soportar la una o más bobinas magnéticas internas (105) suspendidas dentro del cerramiento (120), en el que el uno o más soportes (115) están dispuestos al menos parcialmente dentro de la región de plasma (120);
- 55 generar un campo magnético a lo largo de cada uno del uno o más soportes (115), teniendo el campo magnético un gradiente de campo magnético no nulo a lo largo de una longitud del soporte (115) hacia y desde la bobina magnética interna soportada (105), el campo magnético generado usando una corriente suministrada a material eléctricamente conductor dispuesto dentro de cada uno del uno o más soportes (115).
- 60 8. Método según la reivindicación 7, en el que usar una corriente suministrada al material eléctricamente conductor comprende:
- hacer fluir la corriente en un primer sentido hacia la bobina magnética interna (105) en una o más primeras porciones del material eléctricamente conductor; y
- 65 hacer fluir la corriente en un segundo sentido alejándose de la bobina magnética interna (105) en una o más segundas porciones del material eléctricamente conductor.

ES 2 998 511 T3

9. Método según la reivindicación 8, en el que la distancia entre la una o más primeras porciones y la una o más segundas porciones varía a lo largo de la longitud del soporte (115).
- 5 10. Método según la reivindicación 7, en el que el material eléctricamente conductor comprende una bobina de material eléctricamente conductor que tiene una pluralidad de devanados.
11. Método según la reivindicación 10, en el que la pluralidad de devanados definen más de un área en sección transversal.
- 10 12. Método según la reivindicación 10, en el que la pluralidad de devanados definen una única área en sección transversal.

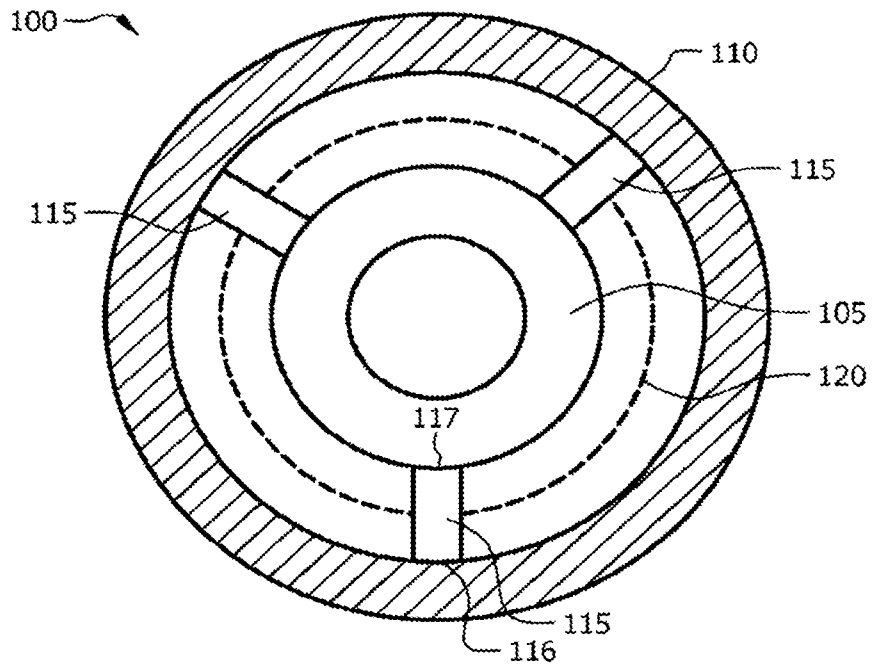


FIG. 1A

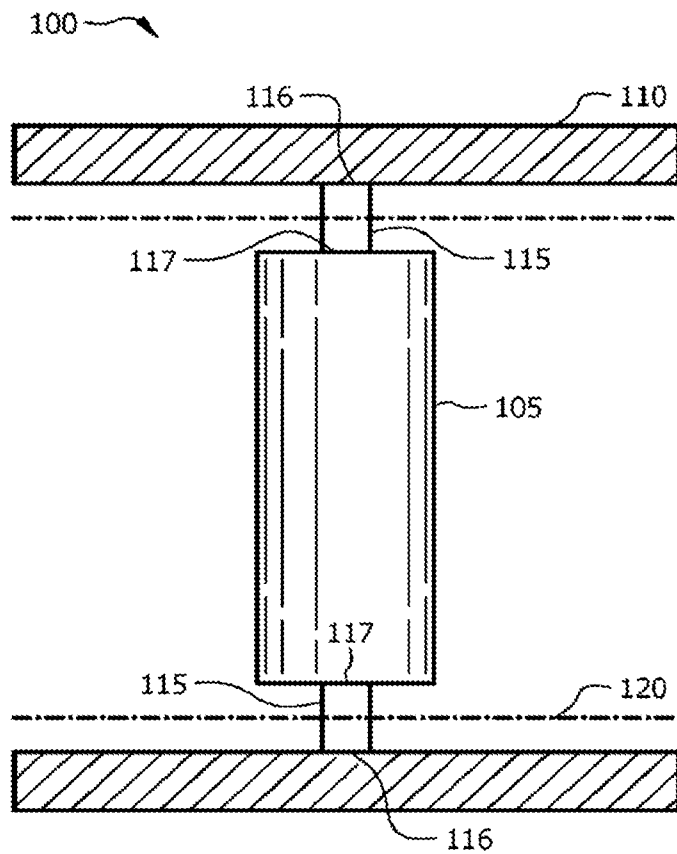


FIG. 1B

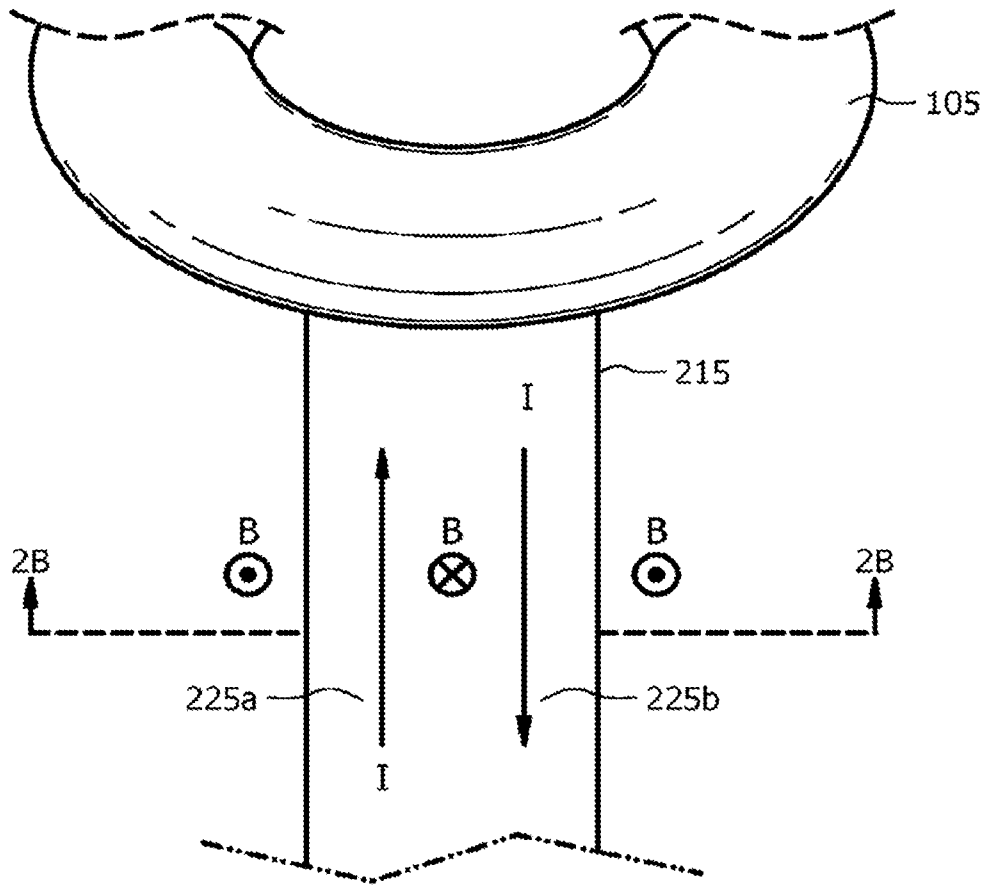


FIG. 2A

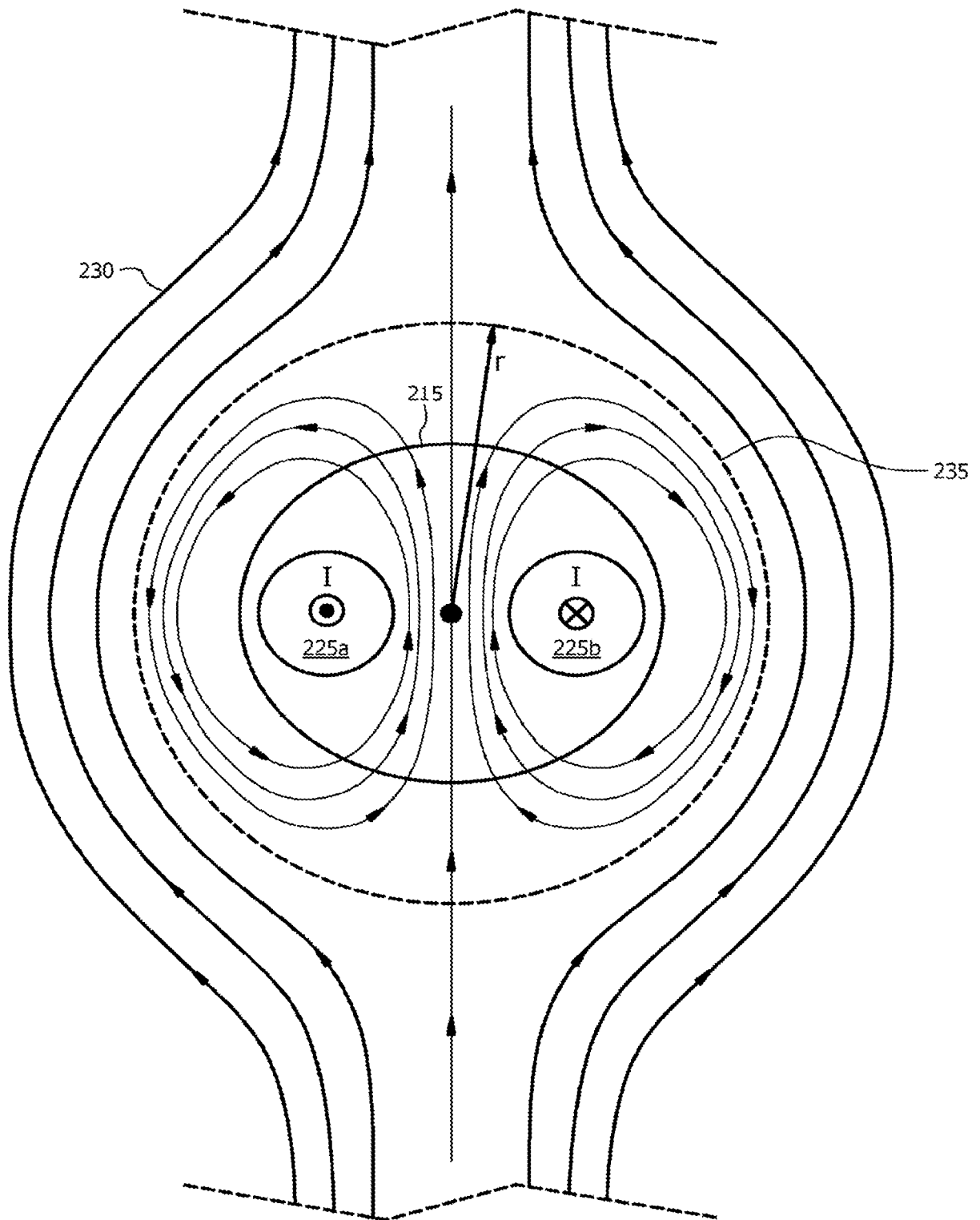


FIG. 2B

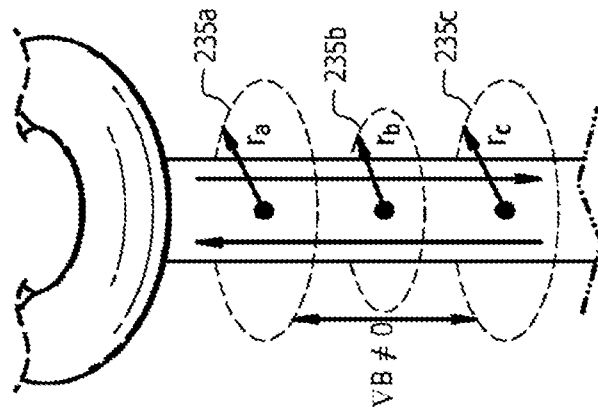


FIG. 3A

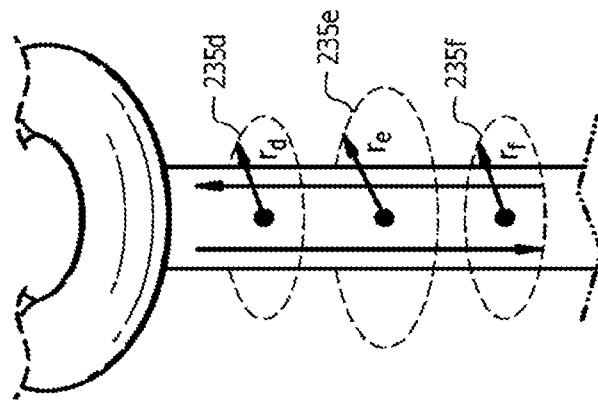


FIG. 3B

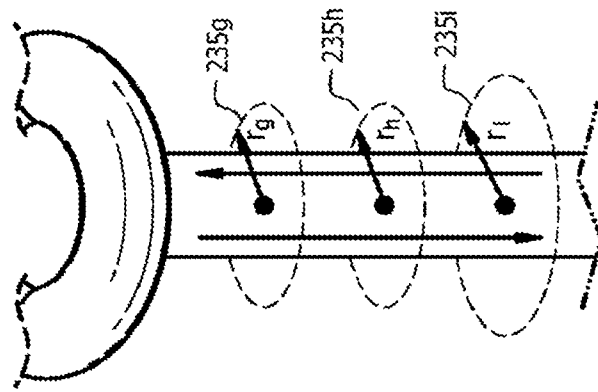


FIG. 3C

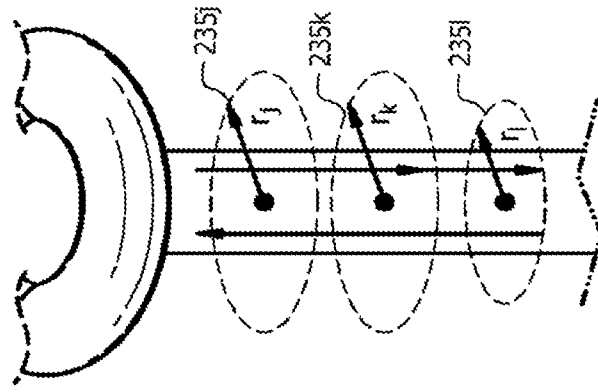


FIG. 3D

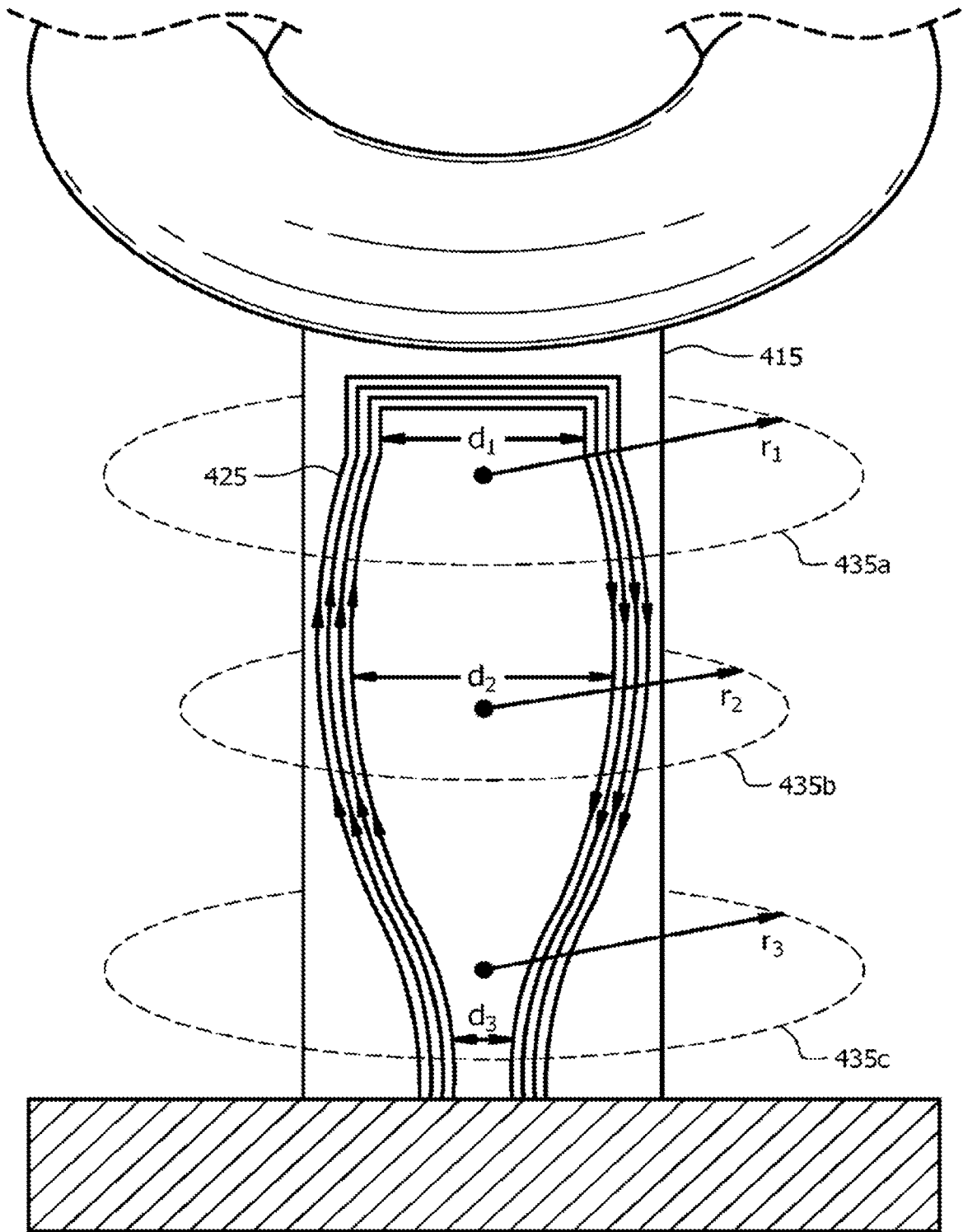
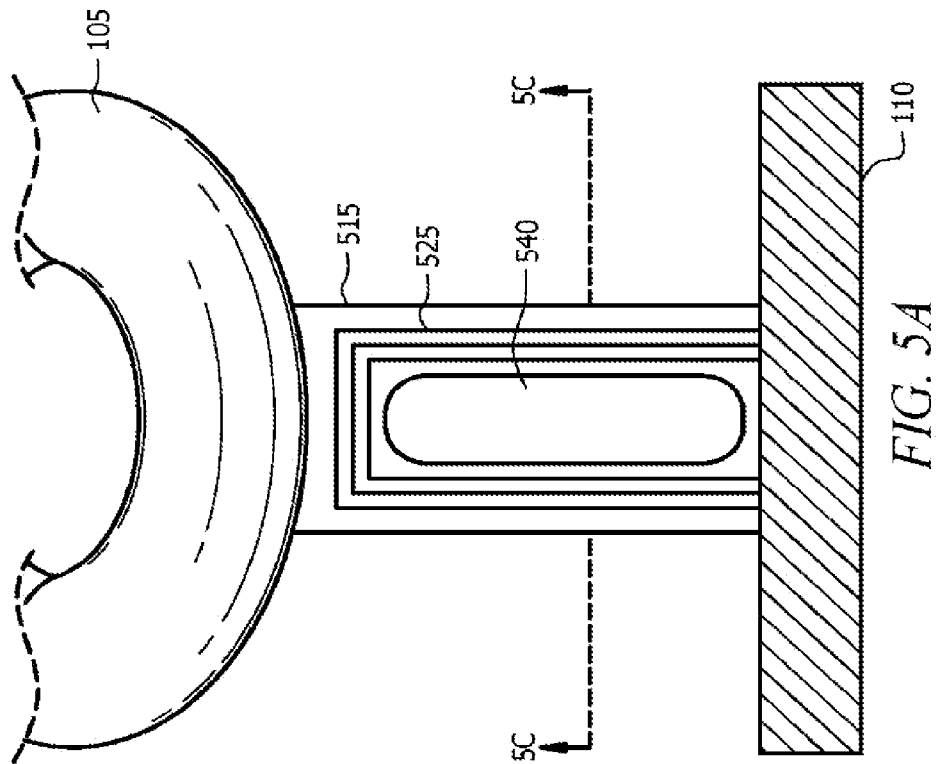
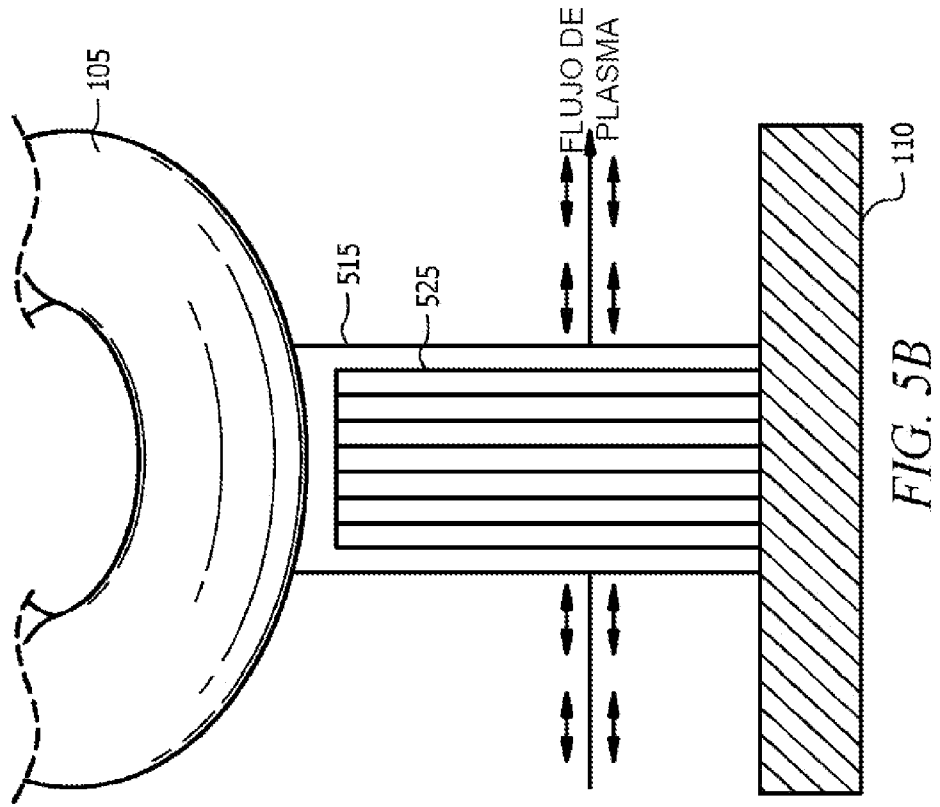


FIG. 4



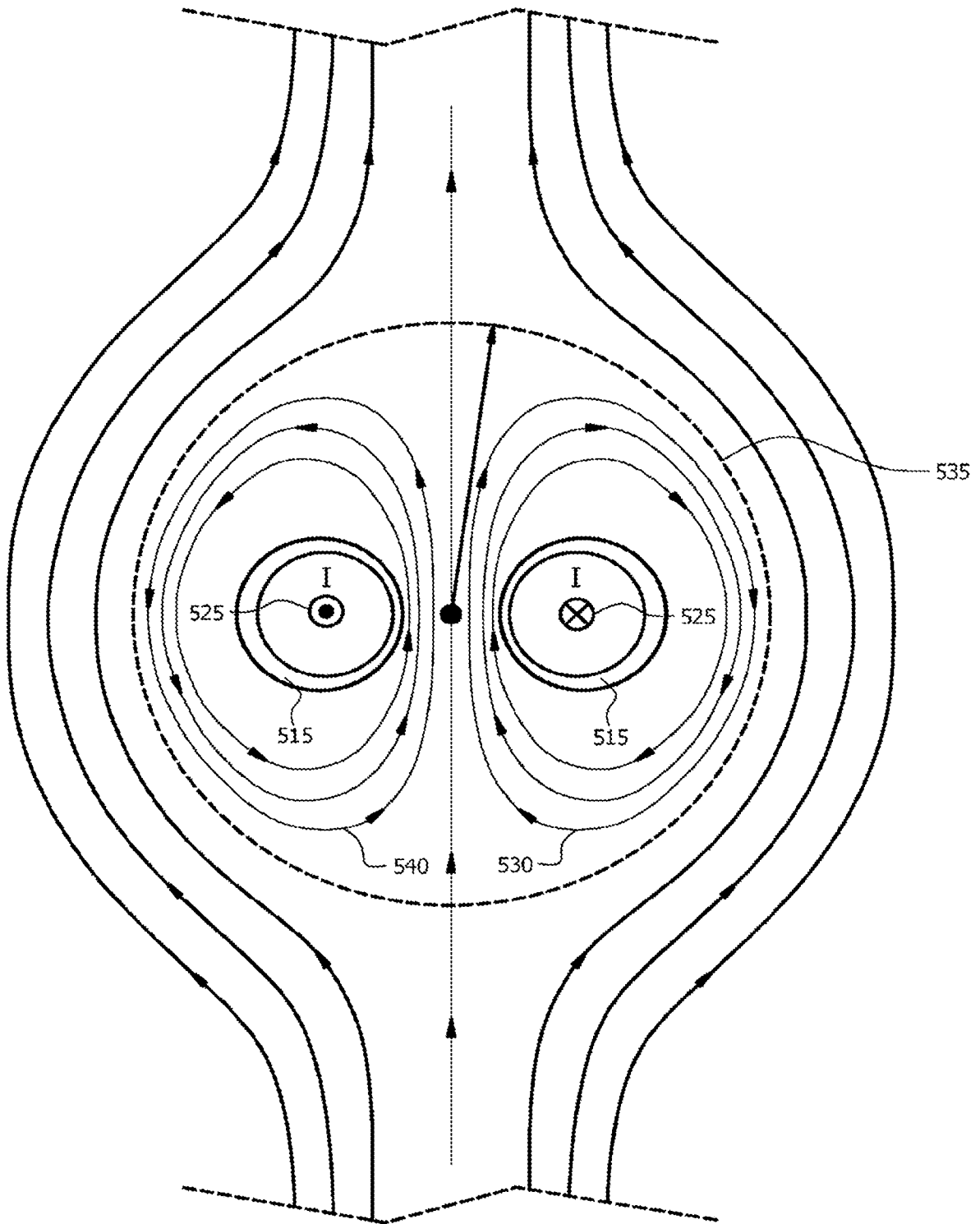


FIG. 5C

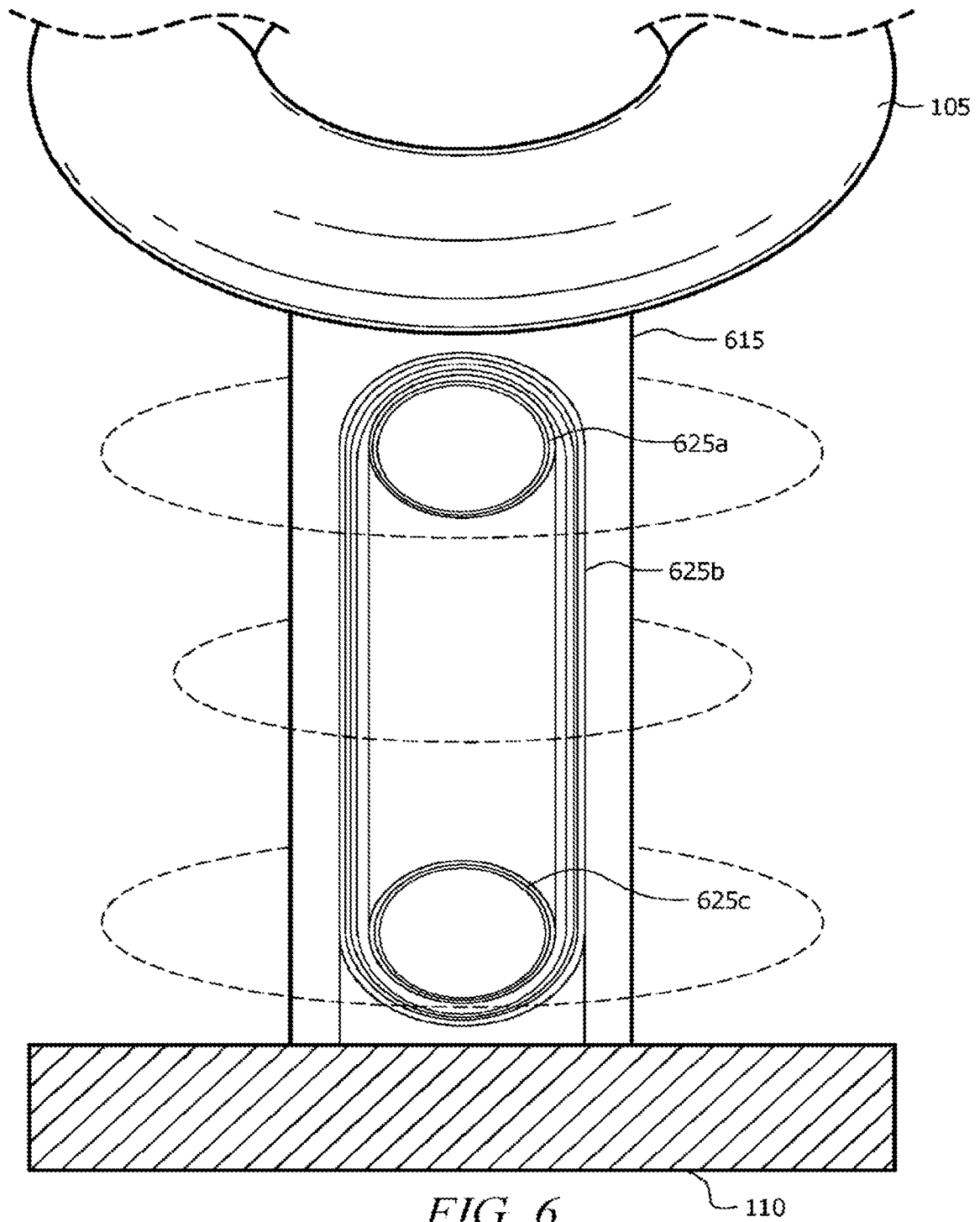


FIG. 6

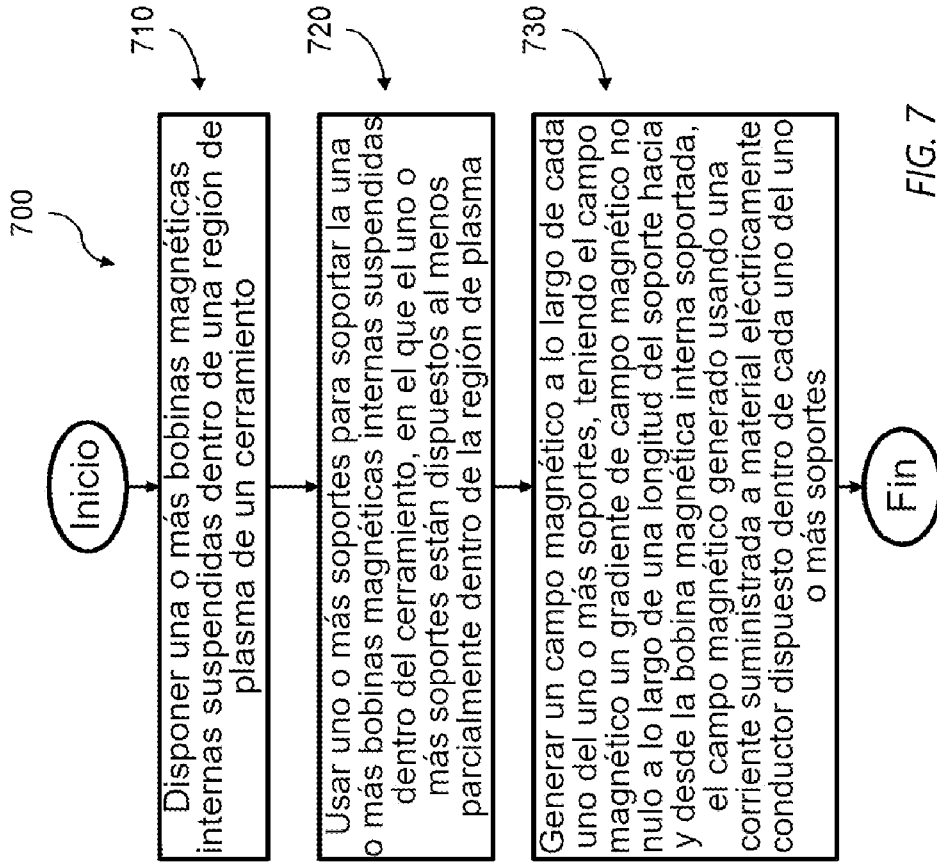


FIG. 7