

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 914 501**

51 Int. Cl.:

H01F 6/02 (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)
H01F 27/32 (2006.01)
G21K 1/093 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)
G21K 5/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.01.2019 PCT/GB2019/050275**
 87 Fecha y número de publicación internacional: **08.08.2019 WO19150123**
 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.01.2019 E 19704419 (1)**
 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.03.2022 EP 3747033**

54 Título: **Bobinas HTS parcialmente aisladas**

30 Prioridad:

01.02.2018 GB 201801621
25.07.2018 GB 201812119
19.11.2018 GB 201818817

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.06.2022

73 Titular/es:

TOKAMAK ENERGY LTD (100.0%)
173 Brook Drive Milton
Abingdon, Oxfordshire OX14 4SD, GB

72 Inventor/es:

SLADE, ROBERT;
KRUIP, MARCEL;
VAN NUGTEREN, BAS;
BRITTLES, GREG;
RUIZ DE VILLA VALDÉS, ENRIQUE;
BATEMAN, ROD y
DOWN, ALUN

74 Agente/Representante:

BALLESTER INTELLECTUAL PROPERTY S.L.P.U

ES 2 914 501 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

Bobinas HTS parcialmente aisladas

Campo de la invención

La presente invención se refiere a imanes HTS.

5 **Antecedentes**

El desafío de producir energía de fusión es enormemente complejo. Se han propuesto muchos dispositivos alternativos además de los tokamaks, aunque ninguno ha producido todavía resultados comparables con los mejores tokamaks que funcionan actualmente, tal como JET.

10 La investigación mundial sobre fusión ha entrado en una nueva fase tras el comienzo de la construcción de ITER, el tokamak más grande y caro (c15bn de euros) jamás construido. La ruta exitosa hacia un reactor de fusión comercial exige una operación estable y de pulsos largos combinada con la alta eficiencia requerida para que la producción de electricidad sea económica. Estas tres condiciones son especialmente difíciles de lograr simultáneamente, y el programa planificado requerirá muchos años de investigación experimental en ITER y otras instalaciones de fusión, así como investigación teórica y tecnológica. Se anticipa ampliamente que un reactor de fusión comercial desarrollado a través de esta ruta no se construirá antes de 2050.

15 Para obtener las reacciones de fusión requeridas para la generación económica de energía (es decir, mucha más energía de salida que de entrada), el tokamak convencional tiene que ser enorme (como lo ejemplifica ITER) para que el tiempo de confinamiento de energía (que es aproximadamente proporcional al volumen de plasma) pueda ser lo suficientemente grande para que el plasma pueda estar lo suficientemente caliente para que se produzca la fusión térmica.

20 El documento WO 2013/030554 describe un enfoque alternativo, que implica el uso de un tokamak esférico compacto para su uso como fuente de neutrones o fuente de energía. La forma de plasma de baja relación de aspecto en un tokamak esférico mejora el tiempo de confinamiento de las partículas y permite la generación de energía neta en una máquina mucho más pequeña. Sin embargo, una columna central de diámetro pequeño es una necesidad, lo que presenta desafíos para el diseño del imán de confinamiento de plasma. Las bobinas de campo superconductoras de alta temperatura (HTS) son una tecnología prometedora para tales imanes.

25 Otro uso potencial de los imanes HTS es en dispositivos de terapia con haz de protones. La terapia de haz de protones (PBT, también conocida como terapia de protones) es un tipo de terapia de partículas utilizada en el tratamiento de cánceres (y otras afecciones que responden a la radioterapia). En PBT, se dirige un haz de protones hacia la ubicación de tratamiento (por ejemplo, el tumor).

30 Otra terapia similar es la terapia de captura de protones y boro (PBCT), en la que se introduce boro-11 en la ubicación objetivo y se usa un haz de protones para iniciar la reacción $p^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$. El mismo aparato se puede utilizar para proporcionar haces de protones para PBT o PBCT.

35 Los haces de protones para PBT y PBCT son generados por aceleradores de partículas tal como ciclotrones o aceleradores lineales. Los aceleradores que se utilizan normalmente para PBT y PBCT suelen producir protones con energías en el intervalo de 60 a 250 MeV, y la instalación en funcionamiento más potente actualmente tiene una energía máxima de 400 MeV.

40 Existen, a grandes rasgos, dos tipos de diseño de dispositivos PBT que permiten variar el ángulo del haz. En el primer tipo de diseño, como se ilustra en la figura 7, el acelerador 3001 está montado en un pórtico 3002, lo que le permite girar alrededor del paciente 3003 (normalmente alrededor de un eje horizontal). El paciente se coloca en una cama móvil 3004, que proporciona más grados de libertad (por ejemplo, movimiento de traslación y rotación alrededor de un eje vertical).

45 El segundo tipo de diseño se ilustra en la figura 8. El acelerador 4001 es estacionario y el haz se dirige al paciente a través de imanes de dirección 4002 (que generalmente incluyen imanes cuadrupolares y dipolares), al menos algunos de los cuales están ubicados en un pórtico 4003, de manera que el haz puede girar alrededor del paciente 4004 (por ejemplo, alrededor de un eje horizontal). El paciente se coloca en una cama móvil 4005.

50 Cualquiera de los diseños requiere que el pórtico sostenga electroimanes capaces de dirigir protones a la energía del haz, que podría llegar a los 400 MeV. Esto requiere campos magnéticos muy altos y, como tales, el uso de imanes HTS puede reducir considerablemente la masa y el tamaño de los electroimanes y el pórtico necesario para moverlos. Los imanes HTS se pueden usar dentro del acelerador, los imanes cuadrupolares de los imanes de dirección o los imanes dipolares de los imanes de dirección.

Los materiales superconductores se dividen típicamente en "superconductores de alta temperatura" (HTS) y "superconductores de baja temperatura" (LTS). Los materiales LTS, tal como Nb y NbTi, son metales o aleaciones metálicas cuya superconductividad puede describirse mediante la teoría BCS. Todos los superconductores de baja

temperatura tienen una temperatura crítica (la temperatura por encima de la cual el material no puede ser superconductor, incluso en un campo magnético cero) por debajo de unos 30K. El comportamiento del material HTS no está descrito por la teoría BCS, y dichos materiales pueden tener temperaturas críticas por encima de unos 30K (aunque se debe tener en cuenta que son las diferencias físicas en la composición y la operación superconductora, en lugar de la temperatura crítica, las que definen material HTS y LTS). Los HTS más utilizados son los "superconductores de cuprato" - cerámicas basadas en cupratos (compuestos que contienen un grupo de óxido de cobre), tal como BSCCO o ReBCO (donde Re es un elemento de tierras raras, comúnmente Y o Gd). Otros materiales HTS incluyen pnictidas de hierro (por ejemplo, FeAs y FeSe) y diborato de magnesio (MgB_2).

El ReBCO normalmente se fabrica como cintas, con una estructura como la que se muestra en la figura 1. Dicha cinta 100 tiene generalmente un espesor de aproximadamente 100 micrómetros e incluye un sustrato 101 (típicamente hastelloy electropolido de aproximadamente 50 micrómetros de espesor), sobre el cual se deposita mediante IBAD, pulverización catódica con magnetron u otra técnica adecuada una serie de capas intermedias conocidas como pila intermedia 102, de espesor aproximado de 0,2 micrómetros. Una capa epitaxial de ReBCO-HTS 103 (depositada por MOCVD u otra técnica adecuada) se superpone a la pila de almacenamiento intermedio, y normalmente tiene un espesor de 1 micrómetro. Se deposita una capa de plata 104 de 1-2 micrómetros sobre la capa HTS mediante pulverización catódica u otra técnica adecuada, y una capa estabilizadora de cobre 105 se deposita sobre la cinta mediante galvanoplastia u otra técnica adecuada, que a menudo encapsula completamente la cinta.

El sustrato 101 proporciona una columna vertebral mecánica que se puede alimentar a través de la línea de fabricación y permitir el crecimiento de capas posteriores. Se requiere que la pila intermedia 102 proporcione una plantilla cristalina texturizada biaxialmente sobre la cual crece la capa de HTS, y previene la difusión química de elementos desde el sustrato al HTS que dañan sus propiedades superconductoras. Se requiere que la capa de plata 104 proporcione una interfaz de baja resistencia desde el ReBCO a la capa estabilizadora, y la capa estabilizadora 105 proporciona una trayectoria de corriente alternativa en caso de que cualquier parte del ReBCO deje de ser superconductora (ingrese al estado "normal").

Además, se puede fabricar cinta HTS "exfoliada", que carece de sustrato y pila de protección, y en su lugar tiene capas de plata en ambos lados de la capa HTS. La cinta que tiene un sustrato se denominará cinta HTS "con sustrato".

Las cintas HTS se pueden organizar en cables HTS. Un cable HTS comprende una o más cintas HTS, que están conectadas a lo largo de su longitud a través de material conductor (normalmente cobre). Las cintas HTS pueden estar apiladas (es decir, dispuestas de manera que las capas HTS sean paralelas), o pueden tener alguna otra disposición de cintas, que puede variar a lo largo del cable. Casos especiales notables de cables HTS son las cintas HTS individuales y los pares HTS. Los pares HTS comprenden un par de cintas HTS, dispuestas de manera que las capas HTS sean paralelas. Cuando se utiliza cinta con sustrato, los pares HTS pueden ser de tipo 0 (con las capas HTS enfrentadas), de tipo 1 (con la capa HTS de una cinta enfrentada al sustrato de la otra) o de tipo 2 (con los sustratos frente a frente). Los cables que comprenden más de 2 cintas pueden organizar algunas o todas las cintas en pares HTS. Las cintas HTS apiladas pueden comprender varias disposiciones de pares HTS, más comúnmente una pila de pares de tipo 1 o una pila de pares de tipo 0 y (o, de manera equivalente, pares de tipo 2). Los cables HTS pueden comprender una mezcla de cinta con sustrato y exfoliada.

Al describir bobinas en este documento, se utilizarán los siguientes términos:

- "Cable HTS" - un cable que comprende una o más cintas HTS. En esta definición, una sola cinta HTS es un cable HTS.
- "espira" - una sección de cable HTS dentro de una bobina que encierra el interior de la bobina (es decir, que se puede modelar como un bucle completo)
- "arco" - una longitud continua de la bobina que es menor que la bobina de campo completa
- "radio interior/exterior" - la distancia desde el centro de la bobina hasta el interior/exterior de los cables HTS
- "perímetro interior/exterior" - la distancia medida alrededor del interior/exterior de la bobina
- "espesor" - la profundidad radial de todas las espiras de la bobina, es decir, la diferencia entre el radio interior y exterior
- "corriente crítica" - la corriente a la que el HTS se volvería normal, a una temperatura y un campo magnético externo dados (donde se considera que el HTS se "ha vuelto normal" en un punto característico de la transición superconductora, donde la cinta genera E_0 voltios por metro. La elección de E_0 es arbitraria, pero generalmente se toma como 10 o 100 microvoltios por metro).
- "temperatura crítica" - la temperatura a la que el HTS se volvería normal, en un campo magnético y corriente dados
- "temperatura crítica máxima" - la temperatura a la que el HTS se volvería normal sin un campo magnético externo y una corriente insignificante.

En términos generales, hay dos tipos de construcción de bobinas magnéticas - por enrollado o por montaje de varias secciones. Las bobinas enrolladas, como se muestra en la figura 2, se fabrican enrollando un cable HTS 201 alrededor de un molde 202 en una espiral continua. La primera tiene la forma para proporcionar el perímetro interior requerido de la bobina y puede ser una parte estructural de la bobina enrollada final o puede retirarse después de enrollarse.

Las bobinas seccionales, como se muestra esquemáticamente en la figura 3, se componen de varias secciones 301, cada una de las cuales puede contener varios cables o barras colectoras preformadas 311 y formarán un arco de la bobina total. Las secciones están conectadas por juntas 302 para formar la bobina completa. Si bien las espiras de las bobinas en las figuras 2 y 3 se muestran separadas para mayor claridad, generalmente habrá material conectando las espiras de la bobina, por ejemplo, se pueden consolidar recubriéndolas con epoxi.

Las bobinas pueden estar "aisladas" - con material eléctricamente aislante entre las espiras de la bobina, o "no aisladas", donde las espiras de la bobina están eléctricamente conectadas radialmente, así como a lo largo de los cables (por ejemplo, conectando las capas estabilizadoras de cobre de los cables por soldadura o por contacto directo). Las bobinas no aisladas no son adecuadas para bobinas de campo grande, por razones que se discutirán con más detalle más adelante.

La figura 4 muestra una sección transversal de un tipo específico de bobina enrollada conocida como "bobina de panqueque", donde los cables HTS 401 se enrollan para formar una bobina plana, de manera similar a un carrete de cinta. Las bobinas de panqueque se pueden fabricar con un perímetro interior que tiene cualquier forma bidimensional. A menudo, las bobinas de panqueque se proporcionan como una "bobina de panqueque doble", como se muestra en la sección transversal de la figura 5, que comprende dos bobinas de panqueque 501, 502 enrolladas en sentido opuesto, con aislamiento 503 entre las bobinas de panqueque y con los terminales internos conectados entre sí 504. Esto significa que solo se necesita suministrar tensión a los terminales exteriores 521, 522, que generalmente son más accesibles, para impulsar la corriente a través de las espiras de la bobina y generar un campo magnético.

Cada uno de los documentos EP 0921535 A2 y US 2009/286685 A1 divulga bobinas HTS parcialmente aisladas.

Sumario

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona una bobina de campo superconductora de alta temperatura, HTS. La bobina de campo HTS comprende una pluralidad de espiras y una capa parcialmente aislante. La pluralidad de espiras comprende material HTS y estabilizador metálico. La capa parcialmente aislante separa las espiras, de modo que la corriente se puede compartir entre espiras a través de la capa parcialmente aislante. La capa parcialmente aislante comprende una capa eléctricamente conductora y una primera y segunda capas aislantes. La capa eléctricamente conductora está recubierta por un lado con la primera capa aislante y por el otro lado con la segunda capa aislante. Cada capa aislante tiene una o más ventanas a través de las cuales se puede realizar el contacto eléctrico entre las espiras y la capa eléctricamente conductora. Las ventanas de la primera capa aislante están desplazadas en el plano de la tira eléctricamente conductora de las ventanas de la segunda capa aislante.

De acuerdo con un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método para fabricar una bobina de campo HTS. Se proporciona un cable HTS, comprendiendo el cable HTS material HTS y estabilizador metálico. Se proporciona una capa parcialmente aislante. La capa parcialmente aislante comprende una capa eléctricamente conductora y una primera y segunda capas aislantes. La capa eléctricamente conductora está recubierta por un lado con la primera capa aislante y por el otro lado con la segunda capa aislante. Cada capa aislante tiene una o más ventanas a través de las cuales se puede hacer contacto eléctrico entre las espiras y la capa eléctricamente conductora. Las ventanas de la primera capa aislante están desplazadas en el plano de la capa eléctricamente conductora de las ventanas de la segunda capa aislante. El cable HTS y la capa parcialmente aislante se ensamblan para formar una bobina de campo HTS, de modo que la corriente pueda compartirse entre espiras del cable HTS a través de la capa parcialmente aislante.

Según un quinto aspecto de la invención, se proporciona un reactor de fusión tokamak que comprende una bobina de campo HTS según el primer aspecto, en el que la bobina de campo HTS es una bobina de campo toroidal o una bobina de campo poloidal.

Según un sexto aspecto de la invención, se proporciona un dispositivo de terapia con haz de protones, PBT, que comprende una bobina de campo HTS según el primer aspecto, en el que la bobina de campo HTS es una de:

- una bobina de campo de un acelerador del dispositivo PBT;
- un imán dipolo o cuadrupolo de un sistema de dirección de haz de protones del dispositivo PBT.

Otras realizaciones de la invención se exponen en la reivindicación 2 y siguientes.

Breve descripción de los dibujos

- La figura 1 es una ilustración esquemática de una cinta HTS;
- La figura 2 es una ilustración esquemática de una bobina HTS devanada;
- La figura 3 es una ilustración esquemática de una bobina HTS en sección;
- La figura 4 es una ilustración esquemática de una sección transversal de una bobina de tipo panqueque;
- La figura 5 es una ilustración esquemática de una sección transversal de una bobina de panqueque doble;
- La figura 6 muestra la corriente, la tensión y la potencia en una bobina parcialmente aislada durante un aumento gradual y en un estado estable;
- La figura 7 es una ilustración esquemática de un dispositivo de terapia con haz de protones;

La figura 8 es una ilustración esquemática de otro dispositivo de terapia con haz de protones;
 La figura 9A es una ilustración esquemática de una capa parcialmente aislante;
 La figura 9B es una vista lateral de la capa parcialmente aislante de la figura 9A;
 La figura 10A es una ilustración esquemática de una capa parcialmente aislante según una construcción alternativa;
 La figura 10B es una sección transversal de la capa parcialmente aislante de la figura 10A;
 La figura 11 es una ilustración esquemática de una capa de ejemplo parcialmente aislante;
 La figura 12 muestra una construcción alternativa de la capa parcialmente aislante;
 La figura 13 muestra un diagrama esquemático de un sistema de enrollado de ejemplo;
 La figura 14 es una sección transversal de un conjunto de capa parcialmente aislante más cinta HTS;
 La figura 15 muestra un ejemplo de bobina encapsulada en soldadura; y
 Las figuras 16 A a E muestran otra construcción alternativa de una capa parcialmente aislante.

Descripción detallada

Como se indicó anteriormente, las bobinas HTS pueden estar aisladas o no aisladas. En general, las bobinas no aisladas no se consideran adecuadas para imanes grandes que funcionan en condiciones en las que son posibles enfriamientos, tal como las bobinas de campo de un tokamak. La falta de aislamiento permite intencionalmente que la corriente se comparta no solo entre las cintas en cada espira del cable, sino también entre las espiras del cable. También son posibles las bobinas "parcialmente aisladas", donde el material entre espiras tiene una resistencia intermedia entre la de un conductor tradicional, por ejemplo, un metal, y la de un aislante tradicional, tal como un aislador cerámico u orgánico, por ejemplo, que tiene una resistividad entre 100 y 10^{15} veces la del cobre o entre 10^{-6} y 10^8 Ohm metro. Tener aislamiento parcial o nulo entre espiras reduce la velocidad a la que aumenta la temperatura de un "punto de acceso" local (zona normal). La tasa de crecimiento (propagación espacial) de una zona normal (HTS resistiva) en un imán HTS depende de muchos parámetros, pero normalmente es inferior a 100 mm/s en la dirección axial (es decir, a lo largo del cable), y aproximadamente 2-100 veces más lento en la dirección transversal (es decir, entre espiras adyacentes). La tasa exacta de propagación de la zona normal en cada dirección depende de las propiedades térmicas y eléctricas de los materiales y la construcción del cable utilizado. En particular, la tasa de propagación transversal se ve afectada por las propiedades térmicas del material entre espiras.

En un imán grande (dimensiones lineales de metros, por ejemplo, un radio superior a 50 cm, y donde las dimensiones de la sección transversal de la bobina son pequeñas (es decir, -10 veces menos) que la dimensión total más grande de la bobina), la propagación transversal puede causar que la sección transversal completa de la bobina se vuelva normal en una zona que cubre una pequeña fracción de la periferia de la bobina, lo que da como resultado que la corriente total de todas las espiras fluya solo en el estabilizador de metal dentro de la sección normal. Fuera de la zona normal, los conductores siguen siendo superconductores. La resistencia de esta zona normal no es suficiente para hacer que la corriente del imán caiga rápidamente, pero hace que la energía magnética almacenada de todo el imán se descargue en este pequeño volumen normal (resistivo), que solo crece lentamente alrededor de la periferia de la bobina. A menos que esta situación se detecte rápidamente para que la energía almacenada del imán pueda descargarse en una resistencia externa a la bobina, la temperatura de la zona normal aumentará de manera muy rápida, lo que probablemente cause un daño significativo a los conductores dentro de la zona normal.

Para bobinas pequeñas (dimensiones lineales de varios centímetros, por ejemplo, radio inferior a 10 cm, donde la sección transversal de la bobina es de un tamaño similar a la dimensión de la bobina más grande), las energías magnéticas almacenadas involucradas son relativamente mucho más bajas y la zona normal se extenderá más uniformemente sobre todo el volumen de la bobina en poco tiempo. En otras palabras, la desactivación se propaga para abarcar toda la bobina antes de que la temperatura de la zona normal exceda un valor perjudicial (normalmente se toma alrededor de 200 K).

Por esta razón, las bobinas sin aislamiento o parcialmente aisladas se han considerado buenas opciones para la protección de desactivación pasiva de imanes HTS pequeños, pero inadecuadas para la protección de desactivación pasiva de imanes grandes.

Además, una bobina no aislada o parcialmente aislada exhibe un retraso en la estabilización del campo magnético durante la aceleración. Esto se debe a que la tensión desarrollada sobre la inductancia de la bobina impulsa la corriente a través del metal entre las espiras. Una bobina HTS no aislada se puede modelar con tres trayectorias de corriente: dos trayectorias en espiral, que siguen las cintas HTS (una en el HTS y otra en el estabilizador de metal), y una trayectoria radial a través del metal (y cualquier otro material resistivo) conectando las espiras del cable HTS no aisladas o parcialmente aisladas entre los terminales de la bobina (si bien esto se puede modelar como una trayectoria única, de hecho, representa la suma de todas las trayectorias resistivas radiales a través del imán). Solo la corriente que fluye en las trayectorias en espiral genera un campo magnético axial significativo en el centro de la bobina. La trayectoria en espiral HTS se puede modelar como un inductor con inductancia L y resistencia cero o despreciable cuando la cinta es superconductora. La trayectoria en espiral del estabilizador de cobre está en paralelo con la trayectoria HTS y tiene la misma inductancia, pero una resistencia significativa. Por esta razón, fluye una corriente insignificante a menos que partes de la trayectoria en espiral HTS comiencen a desactivarse. Si esto sucede, el exceso de corriente por encima de la corriente crítica I_c de la trayectoria en espiral HTS se comparte entre la trayectoria estabilizadora espiral y la trayectoria radial según sus resistencias relativas. La trayectoria de la corriente radial se

puede modelar con una inductancia despreciable y una resistencia R mucho mayor que la trayectoria en espiral, mientras que el HTS es superconductor en todo momento.

La figura 6 muestra la corriente, la tensión y la potencia en una bobina no aislada durante el arranque y la operación en estado estable. Durante el aumento gradual de una bobina no aislada, la corriente inicialmente fluirá principalmente en la trayectoria radial (período A en la figura 6) y luego se estabilizará. La cantidad de corriente que fluye en la trayectoria radial es mayor para velocidades de rampa más rápidas (dado que la tensión desarrollada a lo largo de la trayectoria en espiral, $L \cdot dl/dt$, es mayor - este es el período B). Al final de la rampa, dl/dt cae a cero y la corriente se transferirá a la trayectoria en espiral HTS con una constante de tiempo UR (período C). La mayor parte de la corriente se transferirá a la trayectoria en espiral unas pocas (aproximadamente cinco) constantes de tiempo UR después del final de la rampa. Como tal, la constante de tiempo debe seleccionarse para dar como resultado un tiempo de aceleración razonable, por ejemplo, una constante de tiempo de 5 a 10 horas sería aceptable para la bobina TF de un tokamak (dando un tiempo de aceleración de aproximadamente 1-2 días).

Si hay uniones en el cable HTS utilizado para enrollar la bobina, entonces una pequeña fracción de la corriente de la fuente de alimentación continuará fluyendo en la trayectoria radial durante el período C. La fracción es simplemente la relación de la resistencia de la trayectoria en espiral a la suma de la resistencia radial (es decir, la suma de todas las resistencias espira a espira o entre espiras) y la resistencia de la trayectoria en espiral.

Mantener el tiempo de retardo de carga constante en un imán con L grande exige una resistencia entre espiras relativamente alta, pero mantener baja la temperatura normal de la zona exige una resistencia entre espiras relativamente baja. Por lo tanto, es deseable encontrar una forma de controlar fácilmente la resistencia de espira a espira para lograr el mejor compromiso.

Una consideración adicional en la selección de la resistencia ideal de espira a espira es la carga de calor causada por la conducción de corriente a través de la resistencia radial durante la fase de rampa del imán (períodos A y B). Esta carga de calor adicional, que puede ser sustancial (del orden de varios kW) no requeriría refrigeración adicional si es menor o igual a la carga de calor que se produce durante el funcionamiento del dispositivo que comprende la bobina de campo, por ejemplo, la carga de calor de neutrones para bobinas en un reactor de fusión. Esto es posible porque la carga térmica operativa y la carga térmica creciente no pueden producirse simultáneamente (por ejemplo, porque la fusión no se inicia hasta que el imán TF está en el campo). Por supuesto, también es posible aumentar con una mayor carga de calor (es decir, mayor resistencia de espira a espira) y proporcionar refrigeración adicional; esto generalmente será más costoso, pero permitirá tiempos de rampa más rápidos.

En un imán grande, para evitar daños por una desactivación (ya sea en una bobina aislada o no aislada), también se puede implementar un esquema de protección de desactivación activa. En este esquema, la energía almacenada del imán puede volcarse en algún componente que no sea la región de extinción del imán antes de que pueda producirse un aumento de temperatura suficiente en la región de extinción para causar daños. El otro componente puede ser una resistencia externa o una porción separada del imán que se apaga en una mayor proporción de la masa fría del imán (distribuyendo así la energía almacenada del imán en un gran volumen y reduciendo el aumento de temperatura general). Sin embargo, el enfoque activo requiere que el tiempo entre el inicio de la zona normal (también llamada "punto caliente") y la activación de la rampa descendente ("descarga") de la corriente del imán sea lo suficientemente corto como para que la temperatura terminal del punto caliente sea menos de una temperatura a la que puede producirse daño a la bobina, por ejemplo: alrededor de 200 K.

Por lo tanto, es deseable desarrollar medios para controlar la constante de tiempo de la bobina de tal manera que se pueda aumentar a un campo magnético estable en un marco de tiempo aceptable, al mismo tiempo que se proporciona un grado de distribución de corriente entre las espiras alrededor de una zona normal apagada para limitar la tasa de aumento en la temperatura del punto de acceso.

Los posibles parámetros de la bobina que se pueden variar para seleccionar la constante de tiempo L/R son:

- la inductancia L, que es proporcional al cuadrado del número de espiras, N, en la bobina. Por lo tanto, la constante de tiempo se puede reducir reduciendo el número de espiras. Sin embargo, el campo magnético es proporcional a los amperios-espiras, por lo que generar un campo alto con un número pequeño de espiras requerirá una corriente de transporte más alta que un imán que genere el mismo campo con más espiras y una corriente de transporte más baja.
- la resistencia radial espira a espira, R_T (donde $R = NR_T$)

En términos de estos parámetros, R es aproximadamente proporcional a NR_T , y L es aproximadamente proporcional a N^2 , entonces L/R es aproximadamente proporcional a N/R_T . El valor mínimo de N lo marcará el campo magnético requerido (B), y la corriente máxima por cable (I), ya que B es proporcional a NI. La constante de tiempo y la carga de calor durante la rampa se pueden reducir usando menos espiras, pero esto requerirá una corriente más alta para que el imán produzca un campo dado.

La constante de tiempo y la carga de calor en rampa también se pueden reducir aumentando la resistencia R_T entre cada espira. Sin embargo, aumentando R_T demasiado alto inhibirá el intercambio de corriente entre las espiras, lo que

- reducirá la "protección de desactivación pasiva" de la bobina, es decir, la capacidad de la bobina para recuperarse de un punto de acceso sin apagar y sin descargar energía de la bobina. Los cables de alta corriente requieren múltiples cintas para transportar la corriente y es deseable mantener muy baja la resistencia entre las cintas en una espira, específicamente para permitir un buen reparto de corriente y una alta conductividad térmica entre las cintas; esto hace que la cinta sea resistente a los defectos en la capa superconductora de ReBCO. Cuando cada espira comprende una pluralidad de cintas, la R_T requerida puede ser mucho mayor que la resistencia entre las cintas de cada espira, por lo que la corriente se comparte preferentemente dentro de una espira para evitar defectos de derivación entre espiras - sin embargo, R_T aún debe permitir el intercambio de corriente entre espiras para limitar la tasa de fuga térmica de un punto de acceso y maximizar el tiempo para detectar el problema y descargar el imán.
- 5
- 10 Se ha encontrado que el uso de una bobina aislada parcialmente puede extender significativamente la ventana de tiempo entre el inicio del punto de acceso y la temperatura normal de la zona que supera los 200 K, en comparación con una bobina aislada equivalente, lo que permite un tiempo adicional para el inicio de la descarga del imán. Esto hace que las bobinas parcialmente aisladas con la elección correcta de R_T sorprendentemente adecuado para su uso como bobinas de campo grande en un tokamak.
- 15 Dentro de esta ventana de tiempo, se debe detectar el punto de acceso, el sistema de detección de enfriamiento debe determinar que es probable que el punto de acceso provoque una desactivación (en lugar de disiparse mediante el intercambio pasivo de corriente) y descargar la energía del imán de manera segura, es decir, forzar un gran masa fría a calentarse de manera controlada (la gran masa fría puede ser una parte del imán apagada deliberadamente, por ejemplo, las ramas de retorno de una bobina de campo toroidal).
- 20 La duración de la ventana de tiempo depende de la cantidad de metal conductor, por ejemplo, cobre, en cada espira - con más estabilizador de metal, la ventana de tiempo se extiende. Sin embargo, aumentar la cantidad de estabilizador reducirá la densidad de corriente de las bobinas, lo que no es deseable en aplicaciones con espacio limitado, tal como la columna central de una bobina de campo toroidal (donde una mayor densidad de corriente permite un escudo de neutrones más grueso en un reactor de fusión y, por lo tanto, menos carga de calor, o una relación de aspecto más favorable o un tamaño total más pequeño para un tokamak esférico).
- 25
- Los enfoques actuales de protección de desactivación que usan bobinas aisladas para tokamaks esféricos dan como resultado más estabilizador de metal en las espiras, lo que a su vez da como resultado dispositivos más grandes y costosos para aumentar la ventana de tiempo a niveles manejables, pero la ventana de tiempo aún es corta (del orden de 0,5 a 1 segundo). El uso de una bobina de campo toroidal no aislada o parcialmente aislada permitiría extender la ventana de tiempo y aumentar la densidad de corriente, ya que las bobinas no aisladas o parcialmente aisladas requieren menos estabilizador de metal que las bobinas aisladas. De hecho, el límite en la densidad de corriente para una bobina de campo toroidal no aislada es un problema mecánico más que eléctrico, ya que la tensión en la columna central se convierte en el factor limitante a medida que aumenta la densidad de corriente. Eventualmente, la tensión resultante en los materiales de la cinta se transfiere a la capa de ReBCO, lo que provoca la degradación en la corriente crítica.
- 30
- 35
- Se considera un imán de campo toroidal (TF) de ejemplo que tiene un radio de plasma de 1,4 m y un campo magnético de 5 T con 18 ramas. La corriente total de la barra central de TF sería de 35 MA. Suponiendo una corriente de transporte de 10 kA, cada rama tendría 196 espiras y la inductancia total de TF sería de aproximadamente 46 H. Para lograr una constante de tiempo de 1,4 horas (para tener un tiempo de rampa total de aproximadamente 6 horas) se requeriría una resistencia radial para cada rama individual de aproximadamente 0,5 miliohmios. Por lo tanto, la resistencia media espira a espira R_T debe ser de 2,54 microhmios para lograr la constante de tiempo deseada.
- 40
- A través del modelado, se ha encontrado que esto se puede lograr utilizando una capa parcialmente aislante entre espiras con un espesor de 0,05 mm y una resistividad de 0,02 ohm.m, que es 2×10^6 veces más que el cobre normal a 20 K. El experto apreciará que también serían posibles otros parámetros para el aislamiento parcial.
- 45
- 50 La R_T puede ajustarse mediante la selección de metales para el revestimiento dentro del cable HTS y/o entre espiras de la bobina. En los cables HTS típicos, este sería el cobre, pero para permitir una mayor resistencia, se pueden usar otros metales, tal como acero inoxidable. Como alternativa o adicionalmente, se puede aumentar la separación entre espiras de la bobina, dando como resultado una capa de metal más gruesa (y por lo tanto más resistente) entre espiras de la bobina. Materiales adecuados que también satisfarían otras restricciones de ingeniería (por ejemplo, densidad de corriente y estabilidad estructural) incluyen germanio y otros semiconductores.
- Otra alternativa es utilizar metales normales (es decir, no superconductores) para el aislamiento, pero ajustando la geometría de la trayectoria de la corriente utilizando un aislamiento convencional. En otras palabras, aumentar la distancia sobre la cual la corriente se ve obligada a fluir entre espiras. El material entre las espiras de la bobina puede incluir una capa parcialmente aislante que comprende una tira de metal (u otra tira eléctricamente conductora) que tiene un "aislamiento con fugas", como se muestra en las figuras 9A y B. La tira de metal 901 está provista de un delgado revestimiento aislante 902 al menos en los lados orientados hacia los cables HTS, donde el revestimiento aislante se ha quitado o falta sobre las ventanas (u "orificios pasantes") 903 a intervalos en cada lado de la tira de metal. Las ventanas pueden tener cualquier forma y pueden extenderse hasta los bordes de la cinta. La ubicación de las ventanas a ambos lados de la tira de metal está escalonada, como se muestra en la figura 9B, lo que aumenta la
- 55

resistencia (en comparación con una tira sin aislamiento o con una tira donde las ventanas de cada lado estaban directamente opuestas entre sí) a medida que aumenta la corriente debe tomar una trayectoria 910 a lo largo de parte de la longitud de la tira metálica.

5 La resistencia de la capa parcialmente aislante que se muestra en las figuras 9A y B (es decir, la resistencia espira-espira) dependerá de:

- la distancia entre ventanas adyacentes del mismo lado (a mayor distancia, mayor resistencia). Este es el efecto dominante.
- el desplazamiento entre ventanas adyacentes en lados opuestos, es decir, la distancia entre una ventana en un lado y la ventana adyacente en el lado opuesto (mayor desplazamiento conduce a más resistencia)
 - La resistencia también variará con el desplazamiento relativo a cada lado de una ventana, y se maximiza para una distancia dada entre ventanas del mismo lado cuando las ventanas de un lado están a medio camino entre las ventanas más cercanas del lado opuesto. Esta disposición también proporciona un calentamiento resistivo uniforme de la capa parcialmente aislante.
- el espesor de la tira de metal (donde el desplazamiento es significativamente mayor que el espesor, un mayor espesor conduce a una menor resistencia)
- el ancho de la tira de metal (a mayor ancho, menor resistencia)
- la resistividad de la tira de metal (mayor resistividad conduce a más resistencia)
- el área de las ventanas (a mayor área, menor resistencia). Sin embargo, el área de la ventana solo es significativa si la distancia entre las ventanas es comparable a las dimensiones de la ventana.

20 La relación exacta se puede modelar mediante técnicas comúnmente disponibles como se conoce en la técnica o mediante experimentación simple.

No es esencial que la separación de las ventanas sea regular. El factor importante es que para que la corriente pase de la espira de un lado de la tira al otro, debe pasar a través de una ventana hacia la tira, luego a lo largo de la tira y salir por otra ventana en el lado opuesto de la tira. Es claramente posible que la corriente que ingresa a una ventana se divida en múltiples trayectorias y salga a través de varias ventanas. La proporción de corriente que sigue cada trayectoria dependerá simplemente de la impedancia de esa trayectoria (la impedancia estará dominada por la resistencia de las trayectorias para desacelerar las corrientes variables, pero las inductancias de las trayectorias entrarán en juego para corrientes rápidamente variables).

30 A menos que la distancia entre ventanas en lados opuestos de la tira sea comparable a las dimensiones de la ventana, la resistencia de la trayectoria entre ventanas estará dominada por la distancia entre ventanas y será proporcional a la distancia entre ventanas e inversamente proporcional al espesor de la tira. Esta es la disposición deseada para la tira parcialmente aislante.

Si se desea variar la resistencia en diferentes puntos de la bobina, cualquiera de estas propiedades puede cambiarse a lo largo de la capa parcialmente aislante.

35 El revestimiento aislante puede ser, por ejemplo, poliamida aplicada en forma de cinta de Kapton™ o como líquido, película de mylar, barniz aislante o cualquier otro aislante adecuado.

El metal puede ser cobre, latón, acero inoxidable, hastelloy o cualquier otro metal adecuado (o conductor no metálico) según se requiera. El uso de materiales tales como acero inoxidable o hastelloy permite que la capa parcialmente aislante también brinde una estabilidad estructural mejorada, en comparación con un imán de cobre convencional, lo que ayuda a lidiar con las grandes tensiones experimentadas en un tokamak de alto campo.

45 La bobina HTS se puede enrollar normalmente, con la capa parcialmente aislante colocada entre las espiras a medida que se enrollan. La bobina HTS se puede encapsular en resina o soldar entre sí - en este último caso, la capa parcialmente aislante se puede recubrir opcionalmente con un revestimiento soldable para mejorar la adhesión de la soldadura entre espiras. La capa parcialmente aislante se bobina continuamente con las espiras del HTS, de manera que separa cada espira de la bobina.

Las ventanas se pueden fabricar por grabado, por corte de una tira de aislamiento antes de la aplicación a la tira de metal, por recubrimiento por pulverización enmascarado, por impresión de chorro de tinta, o por otros métodos adecuados como se conoce en la técnica (por ejemplo, usando técnicas conocidas para fabricación de PCB flexible).

50 Cuando la distancia entre las ventanas es significativamente mayor que el tamaño de las ventanas, y las ventanas están desplazadas de tal manera que las ventanas de un lado están a mitad de camino entre las ventanas del otro lado, la resistencia de espira a espira R_{TT} se puede aproximar como:

$$R_{TT} = \frac{d^2 \rho}{4wtL}$$

donde d es la distancia entre ventanas (es decir, entre una ventana y la siguiente ventana del mismo lado), p es la

resistividad (teniendo en cuenta que las bobinas estarán operando a baja temperatura y alto campo magnético), w es el ancho de la cinta, t es el espesor de la tira de metal y L es la longitud promedio de cada espira.

5 Por ejemplo, se podría lograr una resistencia de espira-espira de 2,54 microohmios con una tira de latón ($\rho = 45 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ a -20 K) que tuviera un ancho de 20 mm, un espesor de 50 micrómetros, una longitud de espira de 16,2 m, y una distancia entre ventanas d de 60,5 mm.

10 Una estructura alternativa de "aislamiento con fugas" se muestra en las figuras 10A (vista en planta) y 10B (sección transversal B-B en 10A). Como se describió anteriormente, la tira de metal 1001 está provista de un delgado revestimiento aislante 1002 en al menos los lados orientados hacia el HTS. En este caso, en lugar de proporcionar ventanas separadas longitudinalmente como en el ejemplo anterior, cada revestimiento aislante 1002 tiene una sola ventana 1003 (o "carril") que se extiende a lo largo de la tira de metal, y la ventana a cada lado del metal la tira está en un borde opuesto (por ejemplo, la tira puede tener una ventana a la izquierda de la superficie superior y a la derecha de la superficie inferior, visto desde un extremo de la tira).

Se muestra que las ventanas se extienden hasta el borde de la tira de metal, pero este no tiene por qué ser el caso, es decir, puede haber material aislante en ambos lados de la ventana.

15 Las ventanas están dispuestas de manera que no se superponen, permitiendo que la corriente 1010 fluya a través de la tira desplazándose únicamente a lo ancho de la tira.

En esta estructura, la resistencia de espira a espira está determinada por:

- la distancia entre la ventana de un lado y la ventana del otro lado (medida por sus bordes interiores, a lo largo del ancho de la tira, mayor distancia conduce a mayor resistencia)
- 20 • el espesor de la tira de metal (mayor espesor conduce a menor resistencia)
- la resistividad de la tira de metal (mayor resistividad conduce a más resistencia)
- el ancho de cada ventana (a mayor ancho, menor resistencia). Al igual que con el área de las ventanas en la construcción anterior, este es un efecto menor, aunque tenga en cuenta que en este caso la distancia entre las ventanas y el ancho de cada ventana estarán limitados por el ancho de la tira de metal.

25 Cuando la distancia entre ventanas es significativamente mayor que el espesor de la tira, la resistencia de espira a espira se da como:

$$R_{TT} = \frac{s\rho}{tL}$$

donde s es la distancia entre ventanas, ρ es la resistividad (teniendo en cuenta que las bobinas estarán operando a baja temperatura y alto campo magnético), t es el espesor de la tira metálica y L es la longitud de cada espira.

30 Por ejemplo, se podría lograr una resistencia espira-espira de 2,54 microohmios con una tira de acero inoxidable ($\rho = 486 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) que tuviera un ancho de 20 mm, un espesor de 50 micrómetros y una tira sin aislar de 7,9 mm en bordes opuestos en cada lado.

35 En el caso general del cual ambas construcciones anteriores son ejemplos particulares, la capa parcialmente aislante comprende una tira de metal que tiene una delgada capa aislante en cada lado. Cada capa aislante tiene una o más ventanas, que están desplazadas en el plano de la tira de metal con respecto a las ventanas de la otra capa (además del desplazamiento debido al espesor de la tira). La distancia de desplazamiento puede ser mayor que el espesor de la tira de metal y significativamente menor que la longitud de una espira de la bobina (por ejemplo, al menos cinco veces menos, al menos diez veces menos o al menos 100 veces menos). Las ventanas permiten el contacto eléctrico entre la cinta HTS y la tira de metal, lo que da como resultado una trayectoria de corriente entre cintas HTS adyacentes en la bobina enrollada que se desplaza transversalmente a través de la tira de metal (ya sea a lo largo o a lo ancho). Esto permite que la resistencia de la capa parcialmente aislante sea fácilmente controlable variando el posicionamiento y la separación de las ventanas, y da como resultado una mayor resistencia que la que se obtendría con una tira de metal de dimensiones similares sola.

45 Las ventanas pueden distribuirse uniformemente a lo largo de la capa parcialmente aislante, extendiéndose tal distribución a lo largo de toda la longitud de la capa parcialmente aislante. Alternativamente, la distancia entre ventanas (u otras propiedades de las ventanas) se puede variar a lo largo de la capa parcialmente aislante para que la resistencia total de cada espira de la bobina sea constante.

En el caso de que solo se proporcione una ventana en cada capa parcialmente aislante, cada ventana puede extenderse por toda la longitud de la capa parcialmente aislante.

50 Para garantizar el contacto eléctrico a través de las ventanas, la capa parcialmente aislante se puede soldar a los cables HTS durante el enrollado. Alternativamente, el contacto puede lograrse simplemente debido a la presión en la bobina una vez enrollada. Como alternativa adicional, se pueden añadir insertos eléctricamente conductores adicionales en las ventanas, o la tira de metal puede tener protuberancias que se extienden hacia el interior de las

ventanas. Las inserciones o protuberancias pueden llenar toda la ventana o pueden llenar solo una porción de la ventana. Por ejemplo, cuando la ventana es un "carril", las inserciones pueden proporcionarse a intervalos a lo largo de ese carril. Esto da como resultado que las inserciones actúen efectivamente para reducir el tamaño de la ventana y se pueden usar para ajustar aún más la resistencia de la capa parcialmente aislante.

- 5 Todas las distintas disposiciones de las ventanas descritas anteriormente pueden lograrse mediante una combinación de ventanas e inserciones o protuberancias metálicas que llenen parcialmente las ventanas; por ejemplo, la separación de las inserciones metálicas puede variar a lo largo de la capa parcialmente aislante para garantizar que la resistencia por espira de la bobina es constante.

- 10 La conexión física de la capa parcialmente aislante y la bobina HTS puede realizarse solo mediante presión (es decir, simplemente mediante el enrollado compacto de la bobina), mediante una conexión adhesiva (por ejemplo, epoxi) del revestimiento aislante y la superficie exterior del cable HTS, y/o mediante conexiones soldadas entre la superficie metálica exterior de la capa parcialmente aislante y el cable HTS.

- 15 La figura 11 muestra algunas mejoras adicionales que se pueden realizar en la capa parcialmente aislante para garantizar una buena conexión física y eléctrica. Como anteriormente, la capa parcialmente aislante comprende una tira de metal 1101 (u otra conductora de electricidad) y un revestimiento aislante delgado 1102. Las inserciones de metal 1103 pueden colocarse en las ventanas o la tira de metal puede tener protuberancias que se extiendan a través de las ventanas para facilitar el contacto con los cables HTS.

- 20 Como alternativa o adicionalmente, para proporcionar una superficie de soldadura más grande (y, por lo tanto, una fabricación más fácil de la bobina y una bobina unida más fuertemente), la capa parcialmente aislante también puede comprender otras tiras de metal 1104, en lo sucesivo "tiras de conexión" unidas a las caras exteriores de la capa aislante. Estas tiras de conexión tienen un efecto insignificante sobre las propiedades eléctricas de la capa, pero permiten soldar la capa parcialmente aislante al cable HTS a lo largo de sustancialmente toda la superficie.

- 25 La capa parcialmente aislante también puede tener material aislante 1105 unido a los bordes de la capa parcialmente aislante, cubriendo al menos los bordes de la tira de metal 1101, para evitar puentes de soldadura a través de la capa parcialmente aislante y/o a través del revestimiento aislante cuando la bobina se fabrica.

- 30 La capa parcialmente aislante se puede fabricar como una placa de circuito impreso flexible: los revestimientos aislantes se unen a la tira de metal mediante adhesivo y luego se graban para formar las ventanas, y cualquier otro elemento metálico se une al revestimiento aislante o a la tira de metal, según corresponda, de forma que estén en contacto eléctrico con la tira metálica. Alternativamente, el revestimiento aislante puede tener las ventanas precortadas (o dimensionarse para proporcionar "carriles" cuando se aplica a la tira), y luego unirse a la tira de metal durante el enrollado mediante adhesivo. También se pueden utilizar otros métodos de fabricación.

- 35 La figura 12 muestra una construcción alternativa de la capa parcialmente aislante. Como antes, la capa parcialmente aislante comprende una tira metálica 1201 y un revestimiento aislante 1202, dispuestos para formar un "carril" en un borde de cada lado de la tira metálica (como se describe anteriormente con referencia a las figuras 10A y B). En este caso, la tira de metal está provista de un "movimiento" o "torcedura" 1203 - es decir, está doblada de tal manera que la porción de la tira de metal expuesta por la ventana se encuentra en el plano del revestimiento aislante. El revestimiento aislante puede estar provisto de un voladizo 1204, para evitar puentes no deseados entre la tira de metal y la cinta HTS en el otro lado del revestimiento aislante cuando se suelda.

- 40 Si bien lo anterior se ha escrito principalmente desde el punto de vista de una capa parcialmente aislante formada aplicando aislamiento a la tira de metal y luego enrollándola con el cable HTS para formar la bobina, se apreciará que las construcciones en las que se aplica el aislamiento al cable HTS que luego se enrolla con una tira de metal desnuda son equivalentes, al igual que las construcciones en las que el cable HTS, el aislamiento y la tira de metal se unen durante el enrollado. En efecto, la "capa parcialmente aislante" se puede formar in situ cuando se enrolla la bobina.

- 45 En otra alternativa de una capa de aislamiento con fugas, una envoltura helicoidal de material aislante, tal como una cinta de Kapton™, podría envolverse alrededor de una tira de metal, dejando intencionalmente huecos entre las espiras del aislamiento para formar las "ventanas". Alternativamente, cada espira podría envolverse helicoidalmente con una capa aislante, dejando huecos para formar las "ventanas". Sin embargo, controlar la resistividad (es decir, las áreas de contacto de las ventanas y el desplazamiento entre ventanas en lados opuestos) entre espiras adyacentes sería más difícil con el último enfoque.

- 50 Las figuras 16 A a E muestran otra capa alternativa de aislamiento con fugas. Al igual que con los ejemplos anteriores, las características técnicas de este ejemplo no necesariamente deben usarse juntas y pueden combinarse con características de otros ejemplos cuando corresponda. La capa de aislamiento con fugas comprende 5 capas, que son, en orden:

- 55
- una primera capa de conexión de metal 1611;
 - una primera capa aislante 1621;
 - una capa eléctricamente conductora 1630;

- una segunda capa aislante 1622;
- una segunda capa de conexión de metal 1612.

5 Las figuras 16 A a C muestran la disposición de la primera capa de conexión metálica 1611, la capa eléctricamente conductora 1630 y la segunda capa de conexión metálica 1622, respectivamente. Las figuras 16 D y E son secciones transversales a lo largo de las líneas D y E en las figuras 16 A a C.

Como en los ejemplos anteriores, la capa de conexión está presente para facilitar la unión a los cables HTS mediante soldadura.

10 A diferencia de los ejemplos anteriores en los que la capa eléctricamente conductora es una tira continua de metal, en este ejemplo la capa eléctricamente conductora está dividida en varias regiones conductoras. Estas regiones vienen en dos tipos. Las regiones cuadradas 1631 (aunque pueden tener cualquier forma en la práctica) están conectadas por vías 1606 solo a una de las capas de conexión de metal. Estas regiones no afectan a las propiedades eléctricas de la capa parcialmente aislante, pero proporcionan una trayectoria térmica a través de la respectiva capa aislante. Al variar el tamaño de estas regiones y el número de conexiones entre las mismas y la capa de conexión metálica, las propiedades térmicas de la capa parcialmente aislante pueden variar independientemente de las propiedades eléctricas.

15 Cada una de las otras regiones 1632 conecta una ventana 1601 de la primera capa aislante 1621 a una ventana 1602 de la segunda capa aislante 1622. La resistencia entre las ventanas se puede controlar variando la geometría de las regiones 1632 - por ejemplo, donde la región 1632 contiene una pista 1633 que es alargada como se muestra en la figura 16B, aumentar el ancho de la pista reduciría la resistencia entre las ventanas, y aumentar la longitud de la pista (por ejemplo, proporcionando una pista no lineal o moviendo las ventanas) aumentaría la resistencia entre las ventanas.

20 Las ventanas 1601 en la primera capa aislante están formadas por vías perforadas a través de la primera capa de conexión y la primera capa aislante, que luego se recubren con metal 1603 (u otro material eléctricamente conductor) para conectar la primera capa de conexión y la capa eléctricamente conductora. Las ventanas 1602 en la segunda capa aislante se forman perforando una vía 1602 a través de todas las capas, que luego se recubre con metal 1604 (u otro material eléctricamente conductor). Para evitar que se forme una conexión con la primera capa de conexión a través de las ventanas 1602 de la segunda capa aislante, la primera capa de conexión se graba alrededor de la vía 1602 para aislarla eléctricamente, y se coloca una tapa aislante 1605 en el extremo de la vía 1602 para asegurarse de que no se produzcan puentes debido a la soldadura o el contacto con el cable HTS.

25 Como alternativa, las ventanas 1602 pueden taladrarse desde el otro lado de la capa parcialmente aislante, de manera que atraviesen la segunda capa de conexión, la segunda capa aislante y la capa eléctricamente conductora, y no atraviesen (o no atraviesen completamente) la primera capa aislante. Como alternativa adicional, todas las ventanas se pueden formar a partir de vías que pasan a través de todas las capas, usándose el grabado de la segunda capa de conexión y una tapa aislante en la segunda capa de conexión para las ventanas 1601 de la primera capa aislante.

30 Como ejemplo, una capa parcialmente aislante de acuerdo con las figuras 16 A a E puede fabricarse mediante un proceso de PCB flexible, de la siguiente manera:

- Se proporciona la primera capa aislante 1621 y se recubre con cobre en sus superficies superior e inferior (para formar la primera capa de conexión 1611 y la capa eléctricamente conductora 1630, respectivamente).
- La primera capa aislante chapada en cobre 1621 (es decir, las capas 1621, 1611m, 1630) se taladra para formar las vías 1601 y los orificios se chapaban (1603).
- La capa eléctricamente conductora 1630 se graba para formar las regiones 1632 (y opcionalmente las regiones 1631, aunque se desea que estas puedan eliminarse por grabado).
- La segunda capa aislante 1622 se aplica a la capa eléctricamente conductora 1630. Este puede ser el mismo aislante que la primera capa aislante o un aislante diferente.
 - En un ejemplo, la segunda capa aislante puede ser un adhesivo que se usa para conectar la segunda capa de conexión.
- La segunda capa de conexión 1612 se aplica a la segunda capa aislante 1622.
- Las vías se taladran como se ha descrito anteriormente para formar las ventanas 1602 en la primera y segunda capas aislantes.
- Las vías están recubiertas de cobre 1604.
- La primera capa de conexión está grabada para aislar las ventanas 1602 de esa capa (1611).
- Se aplica una tapa aislante 1605 al final de las vías que forman las ventanas 1602 en la primera capa de conexión 1611.

35 Por supuesto, cuando solo se utilizan algunas de las características del ejemplo de las figuras 16 A a E en una capa parcialmente aislante, no se realizarán las etapas del método correspondientes a las características ausentes.

Se observará que, en general, las características de los ejemplos de capas parcialmente aislantes descritas

anteriormente se pueden combinar de diversas formas y se pueden usar por separado de otras características en los ejemplos respectivos. Por ejemplo, las ventanas en las capas aislantes se pueden proporcionar como en el ejemplo de "carriles" (figura 10A), con una sola ventana alargada en el borde de cada capa aislante, combinada con la capa conductora de electricidad estampada de la figura 16B, y la capa eléctricamente conductora puede estar provista de un "movimiento" para llevar los contactos eléctricos de la capa eléctricamente conductora modelada al plano de la capa aislante, según la figura 12.

Cabe señalar que, si bien gran parte de la descripción anterior se ha centrado en bobinas HTS grandes, el "aislamiento con fugas" divulgado anteriormente también sería aplicable a bobinas HTS más pequeñas para proporcionar una resistencia controlada de espira a espira en esas bobinas.

A continuación, se discutirán varios métodos de fabricación de una bobina que incluyen dicho "aislamiento con fugas". Estos se presentan solo como ejemplos, y el experto en la materia apreciará fácilmente que son posibles otros métodos de enrollado, y que los elementos de cada ejemplo se pueden combinar en una variedad de formas que no se presentan aquí.

La capa parcialmente aislante puede formarse previamente (por ejemplo, mediante un proceso de fabricación de PCB flexible como se ha descrito anteriormente) o puede formarse in situ durante el enrollado. La aplicación del revestimiento aislante a la tira metálica puede implicar la aplicación de un adhesivo (por ejemplo, un epoxi) al revestimiento aislante y/o a la tira metálica antes de conectarlos.

Cuando la capa parcialmente aislante se forma antes de enrollarse en la bobina (ya sea preformada o en una etapa anterior del proceso de enrollado, como se describe más adelante), la capa se puede proporcionar con una cinta HTS en cada lado para facilitar la conexión durante el proceso de enrollado.

La figura 13 muestra un diagrama esquemático de un sistema de enrollado de ejemplo. La bobina 1300 se enrolla a partir de tres carretes de cinta HTS 1301 y una capa parcialmente aislante 1302. La capa parcialmente aislante se forma in situ a partir de dos carretes de cinta HTS 1311, dos carretes de cinta aislante 1312 recubiertos en cada lado con epoxi seco y un carrete de lámina de acero inoxidable 1313. El conjunto de capa parcialmente aislante más cinta HTS se une pasándolo a través de rodillos de presión y calor 1303 (que pueden omitirse o reemplazarse con rodillos que no apliquen calor o presión significativos si la presión del enrollado es suficiente para curar el epoxi). Cada una de las cintas 1301 de capa parcialmente aislante 1302 y HTS se pasa a través de una caja de fundente 1304 para aplicar fundente a las superficies expuestas.

Mientras que la bobina de la figura 13 se muestra como circular, se puede usar un sistema de enrollado similar para enrollar cualquier forma de bobina (por ejemplo, usando un formador de forma diferente).

La figura 14 muestra una sección transversal de la capa parcialmente aislante más el conjunto de cinta HTS. El conjunto comprende una cinta de acero inoxidable 1401 intercalada entre capas aislantes 1402, que a su vez están intercaladas entre cintas HTS 1403. Cada capa está unida con epoxi, aunque no se usa epoxi en las conexiones directas entre la cinta de acero inoxidable y la cinta HTS (para garantizar una buena conexión eléctrica). Esta forma de fabricar la bobina se prefiere para bobinas más grandes, ya que el radio de curvatura mínimo de la capa parcialmente aislante más el conjunto HTS será más limitado que el de una sola cinta HTS (debido al espesor del conjunto). Sin embargo, esto puede solucionarse "doblado previamente" de manera parcial el conjunto durante la fabricación, es decir, formándolo en un estado parcialmente doblado (de modo que la posición de "deformación cero" se encuentre en un radio de curvatura intermedio entre una cinta recta y el radio mínimo de curvatura de la bobina).

En el ejemplo que se muestra, la cinta aislante está dispuesta para proporcionar la realización de "carriles", con una sola ventana grande en un borde de cada lado de la cinta. Esto se logra desplazando la cinta aislante de la cinta HTS y la cinta de acero inoxidable durante el enrollado, para formar un voladizo 1410. Este voladizo ayuda a evitar puentes eléctricos no deseados entre el HTS y el acero inoxidable cuando se suelda el conjunto, o cuando la bobina está "rellenada con soldadura", como se describe a continuación. Alternativamente, se puede proporcionar una cinta aislante que sea más estrecha que el acero inoxidable y alineada con un borde del acero inoxidable (para proporcionar un "carril" en el otro borde).

Cuando la capa parcialmente aislante tenga ventanas en otras disposiciones, se puede proporcionar soldadura durante el montaje de la capa parcialmente aislante para garantizar la conexión eléctrica entre la cinta HTS y la cinta de acero, por ejemplo, cuando las ventanas no permitan una comunicación fluida con los bordes exteriores de la capa parcialmente aislante. Como alternativa o adicionalmente, se pueden usar insertos metálicos adicionales dentro de las ventanas o protuberancias en la capa metálica, como se describió anteriormente.

Con el fin de consolidar la bobina y proporcionar una mejor conexión eléctrica, la bobina se puede "rellenar con soldadura" o "consolidar con soldadura", es decir, recubrirla completamente con soldadura, que puede penetrar en la bobina (por analogía con el "relleno de epoxi" como es bien conocido en la técnica). La figura 15 muestra un ejemplo de bobina encapsulada en soldadura. La bobina comprende una capa parcialmente aislante 1510 y un cable HTS 1520. La capa parcialmente aislante 1510 comprende una tira de metal 1511 y revestimientos aislantes 1512, donde los revestimientos aislantes tienen un voladizo 1513 que sobresale más allá de los bordes de la bobina. Cuando la bobina se encapsula con soldadura, la soldadura 1530 cubrirá las superficies de la bobina y se extenderá entre las

cintas HTS del cable, asegurando así la conexión eléctrica entre las cintas HTS del cable y entre el cable HTS y la capa de metal. Las superficies metálicas de las cintas HTS y las superficies metálicas expuestas de la capa parcialmente aislante pueden tratarse con fundente antes de la soldadura.

5 A continuación, la bobina se puede mecanizar a lo largo de los planos 1514 (líneas de puntos), para cortar los salientes y alisar la soldadura, lo que garantiza además que no quedan puentes de soldadura a través de los salientes.

10 Cuando la capa parcialmente aislante esté provista de un revestimiento aislante en los bordes en lugar de voladizos (por ejemplo, como se muestra en la figura 11 y se describe anteriormente), la bobina se puede mecanizar hasta este revestimiento aislante después del encapsulado con soldadura. Si la soldadura utilizada no humedece el revestimiento aislante utilizado, es posible que dichos puentes no se formen si el revestimiento aislante en el borde es suficientemente ancho.

Como alternativa a proporcionar voladizos en un lado de la bobina, ese lado de la bobina se puede recubrir con una máscara extraíble (por ejemplo, silicona de dos componentes) que evita que la soldadura cree puentes en las conexiones de ese lado. Esta disposición facilita la alineación de la bobina, ya que todas las cintas HTS y la capa parcialmente aislante pueden disponerse con un extremo que se encuentra en un plano común.

15 Si bien se muestra el encapsulado de soldadura para la realización de "carriles", es igualmente aplicable a las otras construcciones presentadas anteriormente. En algunos casos, se pueden proporcionar voladizos 1513 en ambos lados de cada revestimiento aislante, o a lo largo de solo partes de la longitud de la capa parcialmente aislante, es decir, donde las conexiones a través de la capa aislante no son deseables, sin voladizo donde tales conexiones son aceptables (tales como donde una ventana se extiende hasta el borde de la capa de metal). Si las ventanas en los revestimientos aislantes se colocan de manera que no estén en comunicación fluida con el exterior de la bobina, entonces se puede realizar una etapa de soldadura separada durante el enrollado para soldar las conexiones a través de estas ventanas, o puede usarse cualquiera de los otros métodos de conexión descritos en el presente documento en su lugar (por ejemplo, inserciones de metal adicionales dentro de las ventanas).

25 Cuando la capa parcialmente aislante se puede conectar eléctricamente a la cinta HTS solo mediante presión (por ejemplo, en las realizaciones de las figuras 11 y 12, y otras realizaciones en las que parte de la capa metálica o los componentes conectados eléctricamente a la capa metálica están en el plano del revestimiento aislante), se puede formar una conexión eléctrica entre el HTS y la capa parcialmente aislante sin encapsular la soldadura u otra soldadura, aunque se puede seguir utilizando soldadura si se desea. En este caso, la bobina se puede encapsular con epoxi para mejorar la estabilidad mecánica, aunque se debe tener cuidado para evitar que el epoxi bloquee cualquiera de las conexiones eléctricas (ya sea dentro del cable HTS o entre el cable y la capa parcialmente aislante).

El cable HTS se puede soldar por separado, ya sea antes de enrollarlo o durante el proceso de enrollado. La soldadura durante el enrollado se puede lograr cubriendo cada cinta HTS con soldadura mientras se desenrolla, y pasándolas juntas a través de un rodillo calentado para formar el cable, que luego se enrolla con la capa parcialmente aislante.

35 Debido al pequeño tamaño de los huecos entre el cable HTS y la capa de metal en algunas realizaciones, es posible que la soldadura no humedezca estos huecos durante el encapsulado - esto dependerá de la composición de la soldadura, la capa de metal y la superficie exterior del Cable HTS. Esto generalmente ocurrirá cuando la capa de metal y la superficie exterior del cable HTS sean diferentes. Como tal, en realizaciones donde la conexión eléctrica no se realiza por contacto directo de la capa metálica y el cable HTS, la capa metálica y la superficie exterior del cable HTS pueden ser metales similares o estos huecos pueden soldarse individualmente en lugar de encapsularlos.

40 De manera similar, la soldadura generalmente no humedecerá el hueco entre la capa aislante y la cinta HTS. Después del encapsulado de soldadura, la bobina se puede encapsular con epoxi para consolidar estos huecos (al menos donde tienen comunicación fluida con el exterior de la bobina).

45 En algunos casos (por ejemplo, cuando la capa parcialmente aislante se fabrica como una placa de circuito impreso flexible), puede ser deseable crear longitudes más cortas de capa parcialmente aislante (por ejemplo, de 2 a 5 m) y conectarlas mediante juntas de presión dentro de la bobina. Esto debe considerarse como una sola "capa parcialmente aislante" en cualquiera de los ejemplos anteriores.

50 Si bien la divulgación anterior ha tratado muchas de las variables por igual, se apreciará que, para un imán dado, el proceso de diseño puede restringir algunas variables y permitir la libre elección en otras. Por ejemplo, cuando se conocen el campo magnético requerido y la geometría del imán, el proceso de diseño puede incluir las siguientes etapas:

- determinar el número requerido de "amp-espiras" (es decir, el número de espiras N multiplicado por la corriente de transporte I) para producir el campo magnético requerido.
- seleccionar los valores I y N para proporcionar una inductancia L (dependiente de N) y una resistencia radial R (dependiente de N y la resistencia espira-espira R_{TT}) que logrará una constante de tiempo aceptable (donde "aceptable" dependerá del caso de uso).
- seleccionar las propiedades del aislamiento parcial para proporcionar la R_{TT} requerida.

55

La selección de I y R_{TT} es probable que esté limitada por otros factores, por ejemplo, la corriente de transporte no puede estar por encima de la corriente crítica de los cables HTS, y R_{TT} dependerá del espesor aceptable de la capa parcialmente aislante y del ancho de las cintas (ambos probablemente se establezcan por otras consideraciones, por ejemplo, el espacio disponible y el rendimiento de las cintas HTS).

- 5 Si bien la descripción anterior se refiere a una bobina tipo panqueque enrollada, se aplicarán consideraciones similares a las bobinas seccionales. Para tales bobinas, las dependencias de L y R en los parámetros de la bobina pueden ser diferentes, pero los expertos pueden determinarlas utilizando técnicas normales de diseño de imanes HTS.

- 10 La presente divulgación permite el uso de bobinas no aisladas/parcialmente aisladas al permitir que la constante de tiempo L/R se ajuste para dar un buen equilibrio entre un tiempo de rampa de bobina aceptablemente rápido y una ventana de tiempo larga entre la formación de un punto caliente en una espira y se produzcan daños en la cinta HTS. Esto permite detectar el punto de acceso al monitorizar las temperaturas de la bobina y, si es necesario, activar los sistemas de protección de desactivación activa para reducir la corriente del imán en un período de tiempo más largo en comparación con una bobina aislada equivalente.

- 15 Además, las bobinas no aisladas requieren menos cobre u otro estabilizador metálico que las bobinas aisladas equivalentes, ya que el cobre se puede "compartir" entre los cables HTS (es decir, la bobina en su conjunto requiere suficiente cobre para compartir la corriente de solo un subconjunto de los cables, en lugar de que cada cable HTS requiera suficiente cobre para compartir la corriente de ese cable). Por lo tanto, se pueden lograr densidades de corriente más altas con bobinas parcialmente aisladas, lo que es particularmente útil en aplicaciones como la bobina de campo toroidal de un tokamak esférico, donde el espesor de las bobinas es una consideración de diseño significativa (en el caso de un tokamak esférico) para minimizar el radio de la columna central, o permitir un mayor blindaje de neutrones para un radio de columna central dado).
- 20

- Si se desea el comportamiento de una bobina aislada para el funcionamiento normal, se pueden obtener los beneficios de una bobina no aislada durante una desactivación mediante el uso de material de transición metal-aislante, como el óxido de vanadio, que tiene una resistencia muy alta cuando se enfría y una resistencia relativamente baja (al menos 25 10 veces menor) cuando se calienta por encima de una temperatura de transición (aproximadamente 110 K en el caso del óxido de vanadio). Como tal, una bobina "semi aislada" con un material de transición metal-aislante entre espiras se comportaría como una bobina aislada durante el funcionamiento normal y durante el arranque (que tiene una constante de tiempo muy baja), y como una bobina no aislada durante una desactivación (lo que hará que el material de transición metal-aislante se caliente y se vuelva conductor). Esto permite R_T cuando el metal de transición metal-aislante tiene baja resistencia, debe hacerse lo más bajo posible sin afectar negativamente la constante de tiempo de aceleración (siempre que R_T a bajas temperaturas proporciona una constante de tiempo suficientemente baja, pero esto se puede lograr fácilmente, ya que los materiales de transición metal-aislante tienen una caída muy fuerte en la resistividad alrededor de su temperatura de transición, por ejemplo, una caída de resistividad de al menos 10 veces sobre 10 Kelvin, o incluso una caída de 10^3 veces cae en resistividad por encima de 10 Kelvin).
- 30

- 35 La divulgación anterior se puede aplicar a una variedad de sistemas magnéticos HTS. Además del reactor de fusión tokamak mencionado anteriormente como ejemplo, puede usarse para bobinas HTS en dispositivos de imágenes por resonancia magnética nuclear (NMR/MRI), manipulación de dispositivos magnéticos dentro de un medio no magnético a través de campos magnéticos (por ejemplo, navegación magnética robótica sistemas para manipular dispositivos médicos dentro de un paciente), e imanes para motores eléctricos, por ejemplo, para aviones electrónicos. Como otro ejemplo, la divulgación puede aplicarse a dispositivos de terapia con haz de protones que comprenden sistemas magnéticos HTS que incluyen las características divulgadas, donde los sistemas magnéticos HTS se usan dentro del acelerador del dispositivo PBT, los imanes de dirección cuadripolares o dipolares del dispositivo PBT, o cualquier otro imán del dispositivo PBT.
- 40

REIVINDICACIONES

1. Una bobina de campo superconductor de alta temperatura, HTS, comprendiendo la bobina de campo HTS:
una pluralidad de espiras que comprenden material HTS y estabilizador metálico;
una capa parcialmente aislante que separa las espiras, de manera que la corriente se puede compartir entre
5 espiras a través de la capa parcialmente aislante;
comprendiendo la capa parcialmente aislante:
una capa eléctricamente conductora (901, 1001, 1101, 1201) recubierta por un lado con una primera capa
aislante (902, 1002, 1102, 1202) y por el otro lado con una segunda capa aislante (902, 1002, 1102, 1202);
10 teniendo cada capa aislante una o más ventanas (903, 1003, 1103, 1203) a través de las cuales se puede
hacer contacto eléctrico entre las espiras y la capa eléctricamente conductora;
en el que las ventanas de la primera capa aislante están desplazadas en el plano de la tira eléctricamente
conductora de las ventanas de la segunda capa aislante.
2. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que la capa eléctricamente conductora es
una tira continua eléctricamente conductora.
- 15 3. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 1, en la que la capa eléctricamente conductora comprende una
pluralidad de regiones, conectando eléctricamente cada región una primera ventana respectiva en la primera capa
aislante a una segunda ventana respectiva en la segunda capa aislante, y cada región está aislada eléctricamente en
el plano de la capa eléctricamente conductora de las otras regiones.
- 20 4. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 3, en la que cada región comprende una pista entre la primera
y la segunda ventana, siendo una longitud de la pista entre la primera y la segunda ventana al menos dos veces un
ancho de la pista medido perpendicularmente a la longitud.
5. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 4, en la que cada pista es no lineal.
6. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que las ventanas de la segunda capa son
cada una parte de una vía respectiva que se extiende a través de la primera capa aislante, la segunda capa aislante
25 y la capa eléctricamente conductora, comprendiendo además la capa parcialmente aislante una tapa aislante en cada
vía en el extremo próximo a la primera capa aislante.
7. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que la distancia de desplazamiento entre
cada ventana de una capa y la ventana más cercana en la otra capa es mayor que un espesor de la capa
eléctricamente conductora, y/o en la que la distancia de desplazamiento entre cada ventana en una capa y la ventana
30 más cercana en la otra capa es menos de 1/5 de la longitud de una espira de la bobina de campo HTS, más
preferentemente menos de 1/10, más preferiblemente menos de 1/50.
8. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que cada capa aislante comprende una
pluralidad de ventanas desplazadas a lo largo de una longitud de la capa parcialmente aislante.
9. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 8, en la que las ventanas de cada capa aislante están separadas
35 regularmente con una separación que es la misma para ambas capas aislantes, y en la que cada ventana tiene la
misma área, y/o en la que las ventanas de una capa aislante están desplazadas de las de la capa aislante opuesta de
tal manera que cada ventana en una capa aislante es equidistante de las dos ventanas más cercanas de la capa
aislante opuesta.
10. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 8 o 9, en la que las capas aislantes están formadas mediante:
40 la envoltura helicoidal de una cinta aislante alrededor de la capa eléctricamente conductora; o
la envoltura helicoidal de una cinta aislante alrededor de las espiras;
de manera que los huecos en el devanado helicoidal forman las ventanas.
11. Una bobina de campo HTS según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la que cada capa aislante comprende
45 una sola ventana que se extiende a lo largo de la capa aislante, y la ventana en una capa aislante está desplazada a
lo largo de un ancho de la capa parcialmente aislante desde la ventana en la otra capa aislante.
12. Una bobina de campo HTS según la reivindicación 11, en la que la capa eléctricamente conductora está doblada
de manera que la porción de la capa eléctricamente conductora expuesta por cada ventana se encuentra en el plano
de la capa aislante respectiva.
13. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que cada capa aislante se extiende más
50 allá de la capa eléctricamente conductora en al menos un lado.
14. Una bobina de campo HTS según cualquier reivindicación anterior, en la que:

la capa parcialmente aislante comprende insertos eléctricamente conductores en la o cada ventana; cada ventana está chapada con un material eléctricamente conductor; y/o la capa eléctricamente conductora comprende protuberancias eléctricamente conductoras que se extienden dentro de la o cada ventana;

5 y en la que:

las inserciones o protuberancias eléctricamente conductoras llenan la ventana respectiva; o las inserciones o protuberancias eléctricamente conductoras llenan solo una porción de la ventana respectiva, y el contacto eléctrico entre la capa eléctricamente conductora y las espiras a través de la ventana se realiza únicamente a través de las inserciones eléctricamente conductoras.

10 15. Una bobina de campo HTS de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en la que la capa parcialmente aislante comprende tiras de conexión conductoras de electricidad ubicadas fuera de las capas aislantes y conectadas eléctricamente a la tira conductora de electricidad a través de las ventanas, en la que las tiras de conexión conductoras de electricidad están conectadas eléctricamente a las espiras adyacentes.

15 16. Una bobina de campo HTS según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la capa parcialmente aislante comprende una pluralidad de secciones conectadas por juntas de presión.

17. Un método para fabricar una bobina de campo HTS, comprendiendo el método:

proporcionar un cable HTS, comprendiendo el cable HTS material HTS y estabilizador metálico; proporcionar una capa parcialmente aislante, comprendiendo la capa parcialmente aislante:

20 una capa eléctricamente conductora (901, 1001, 1101, 1201) recubierta por un lado con una primera capa aislante (902, 1002, 1102, 1202) y por el otro lado con una segunda capa aislante (902, 1002, 1102, 1202); teniendo cada capa aislante una o más ventanas (903, 1003, 1103, 1203) a través de las cuales se puede hacer contacto eléctrico entre las espiras y la capa eléctricamente conductora;

en el que las ventanas de la primera capa aislante están desplazadas en el plano de la capa eléctricamente conductora de las ventanas de la segunda capa aislante;

25 ensamblar el cable HTS y la capa parcialmente aislante para formar una bobina de campo HTS, de modo que la corriente pueda compartirse entre espiras del cable HTS a través de la capa parcialmente aislante.

18. Un método según la reivindicación 17, en el que proporcionar la capa parcialmente aislante comprende proporcionar por separado cada capa eléctricamente conductora y capas aislantes, y formar la capa parcialmente aislante durante el enrollado de la bobina HTS.

30 19. Un método según la reivindicación 18, en el que formar la capa parcialmente aislante durante el enrollado de la bobina comprende unir las capas aislantes a la capa eléctricamente conductora con epoxi y curar el epoxi mediante el uso de rodillos de presión calentados inmediatamente antes de enrollar la capa parcialmente aislante en la bobina.

20. Un método según la reivindicación 17, en el que proporcionar la capa parcialmente aislante comprende:

35 unir las capas aislantes a la capa eléctricamente conductora mediante adhesivo; grabar las capas aislantes para formar las ventanas.

21. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 17 a 20, en el que proporcionar la capa parcialmente aislante comprende:

40 proporcionar una primera capa aislante; recubrir una superficie de la primera capa aislante con la capa eléctricamente conductora; unir una segunda capa aislante a la capa eléctricamente conductora; taladrar las ventanas en la primera y segunda capa aislante.

22. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 17 a 21, y que comprende encapsular con soldadura la bobina de campo HTS.

45 23. Un método según la reivindicación 22, en el que al menos una de las capas parcialmente aislantes tiene un voladizo que se extiende más allá de la capa eléctricamente conductora en al menos un lado, y que comprende, siguiendo la etapa de encapsulado de soldadura, mecanizar ese lado de la bobina HTS para un nivel tal que se elimine al menos una porción del voladizo.

50 24. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 22 a 23, y que comprende, antes del encapsulamiento de la soldadura, aplicar una máscara extraíble a un lado de la bobina HTS y retirar la máscara después del encapsulamiento de la soldadura.

25. Un reactor de fusión tokamak que comprende una bobina de campo HTS según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en el que la bobina de campo HTS es una bobina de campo toroidal o una bobina de campo poloidal.

26. Un dispositivo de terapia con haz de protones, PBT, que comprende una bobina de campo HTS según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, en el que la bobina de campo HTS es una de:

una bobina de campo de un acelerador del dispositivo PBT;

un imán dipolo o cuadrupolo de un sistema de dirección de haz de protones del dispositivo PBT.

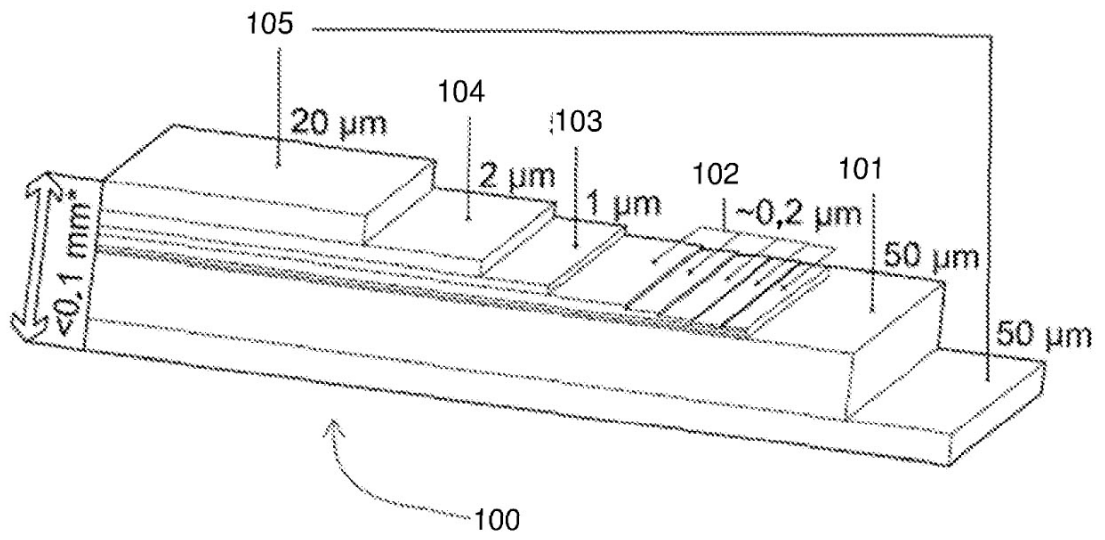


Figura 1

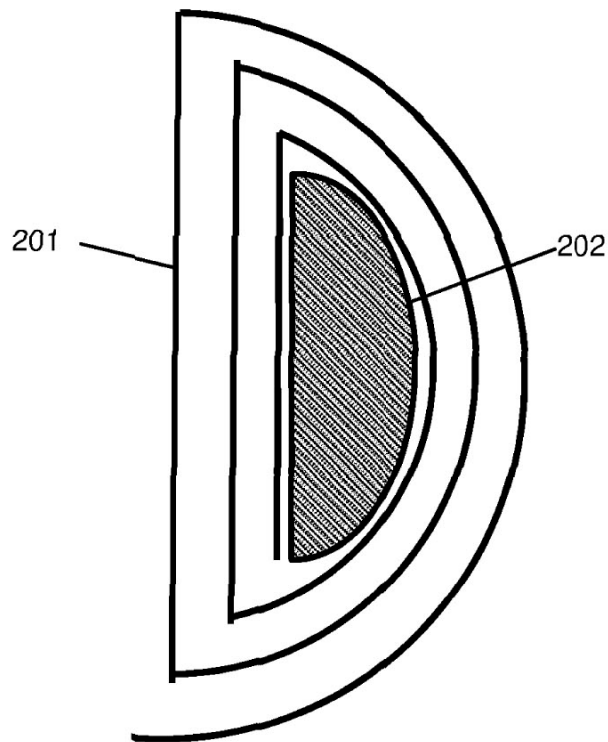


Figura 2

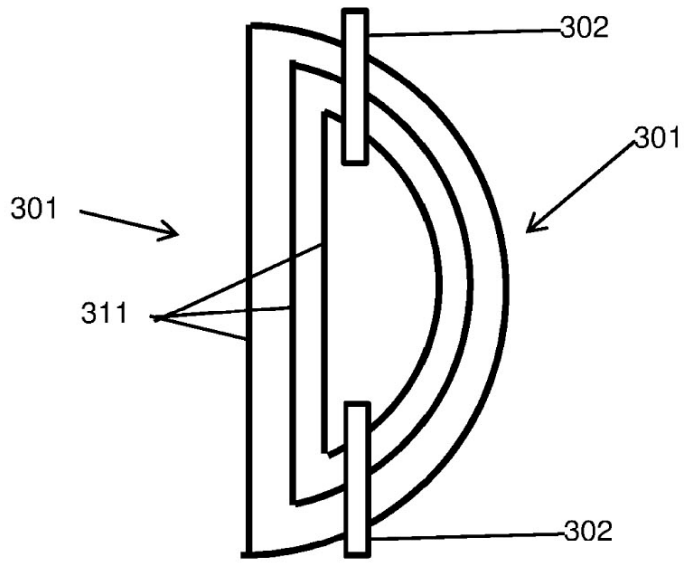


Figura 3

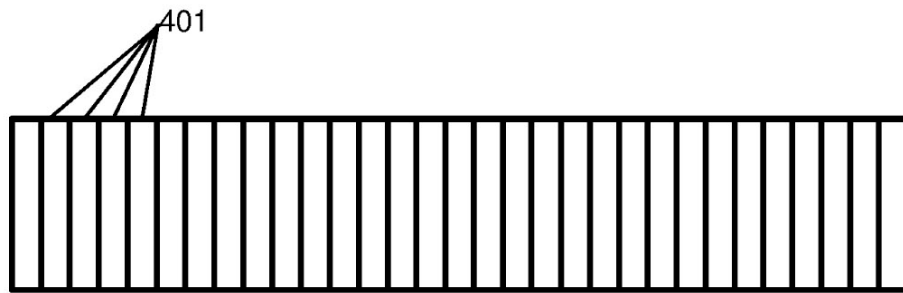


Figura 4

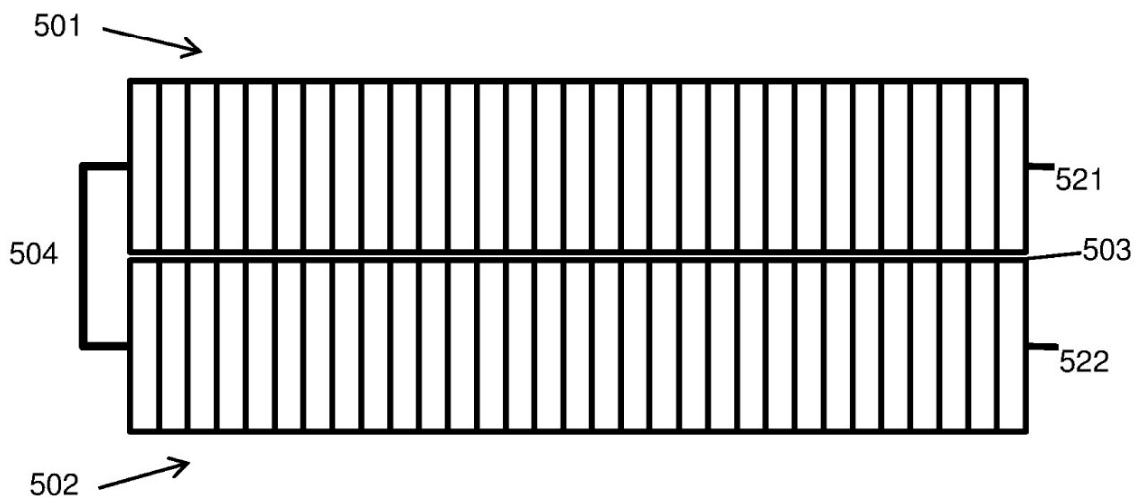


Figura 5

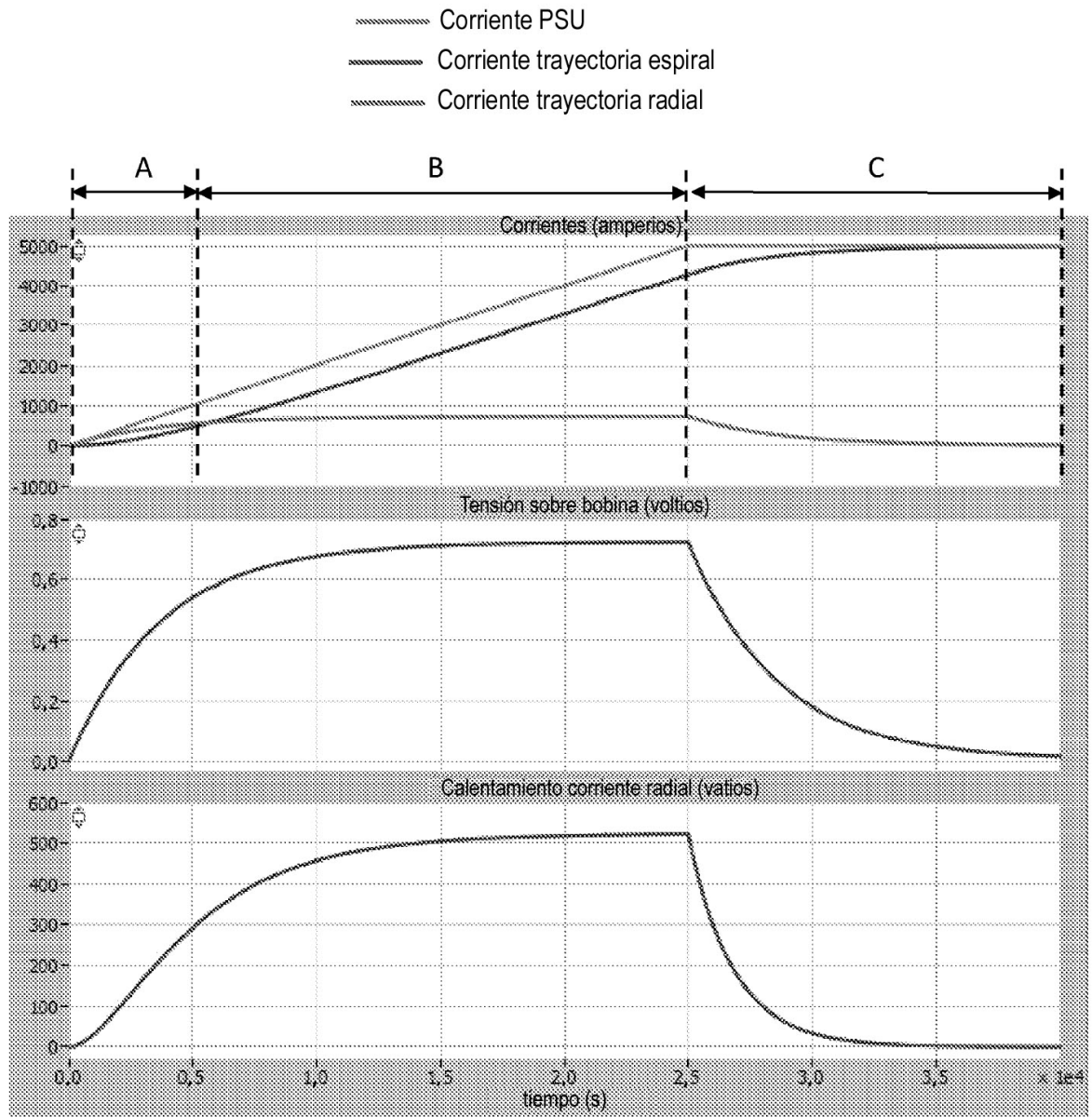


Figura 6

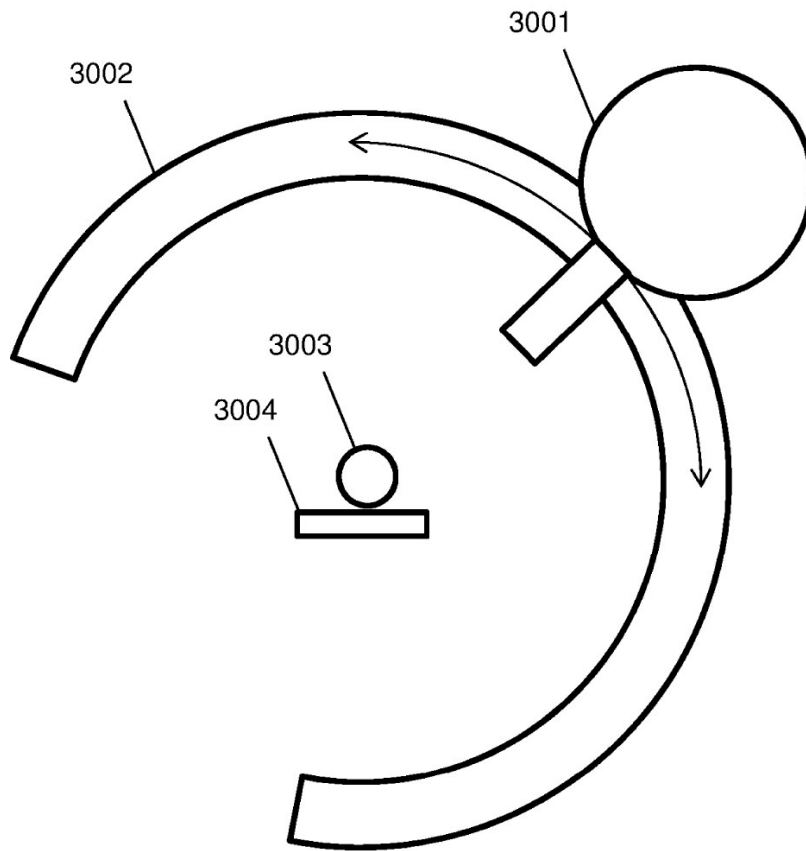


Figura 7

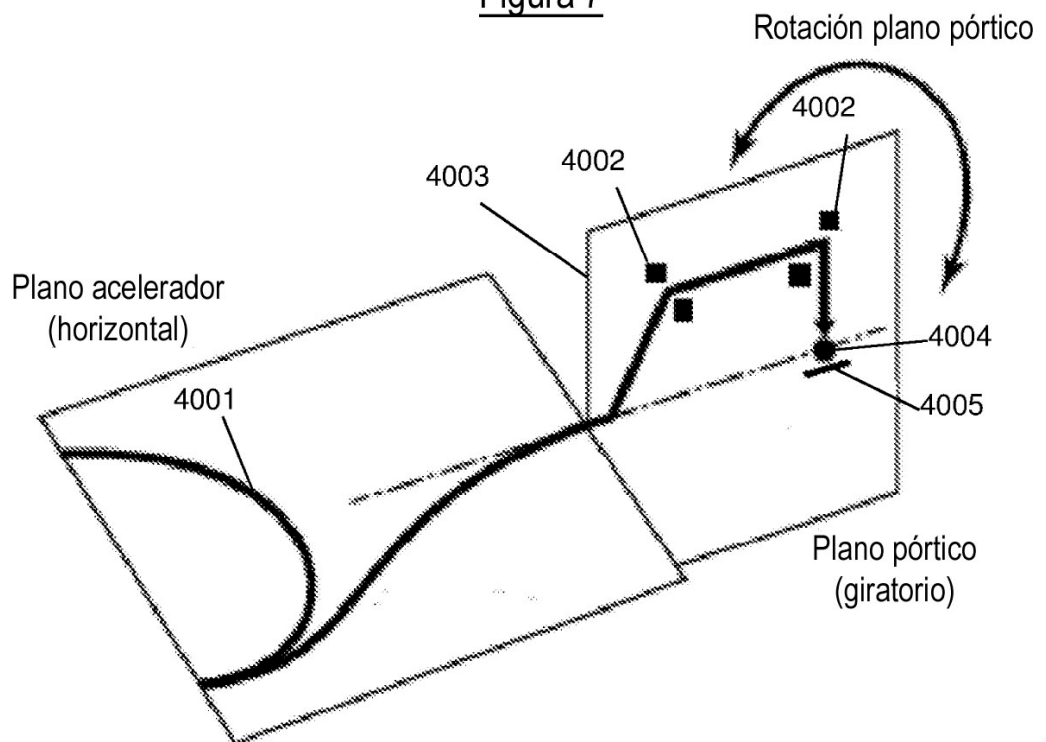
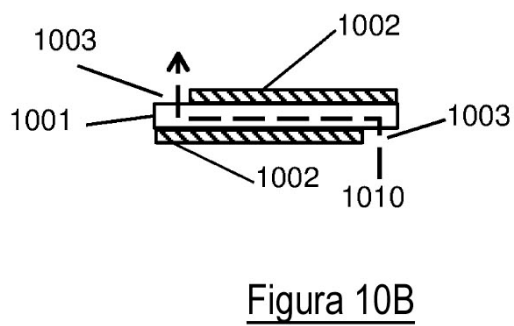
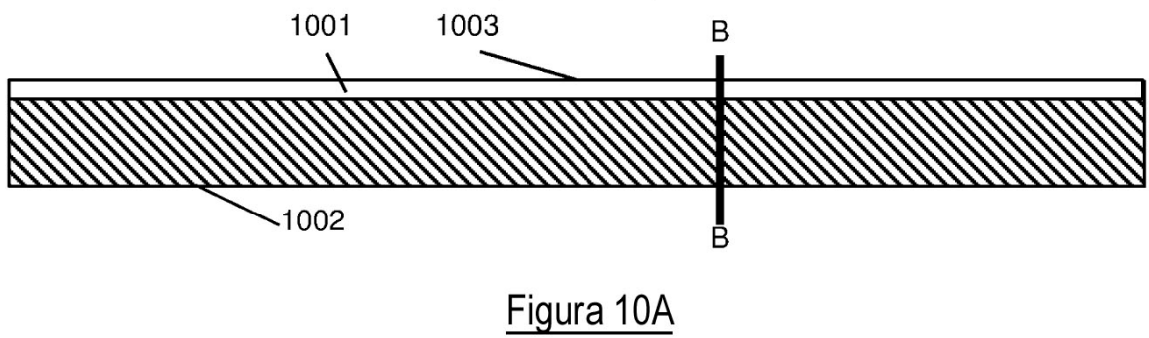
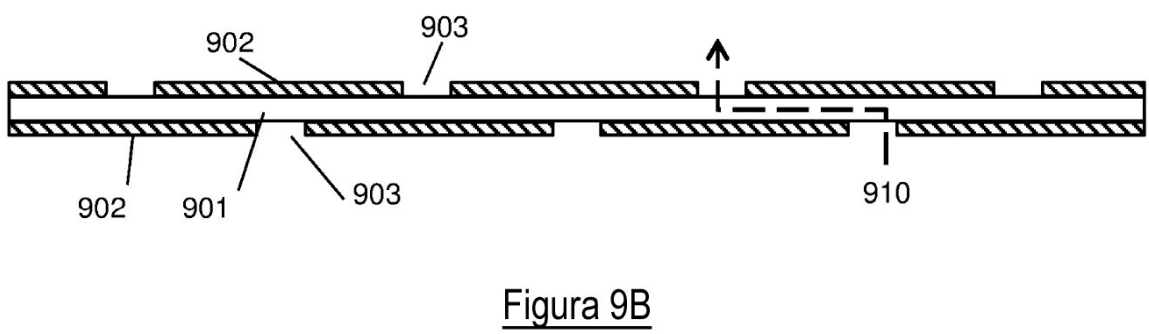
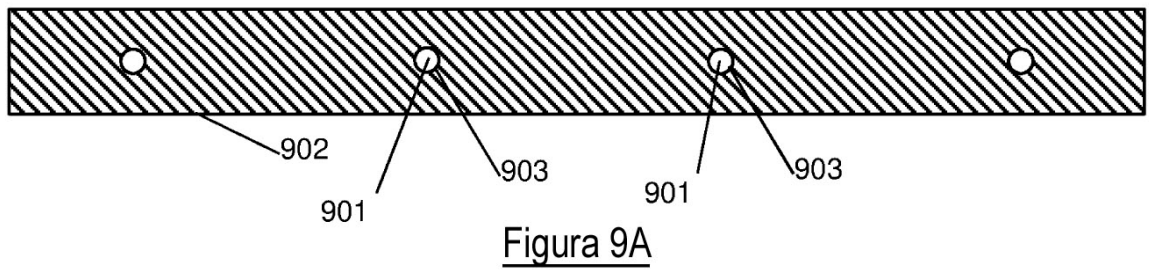


Figura 8



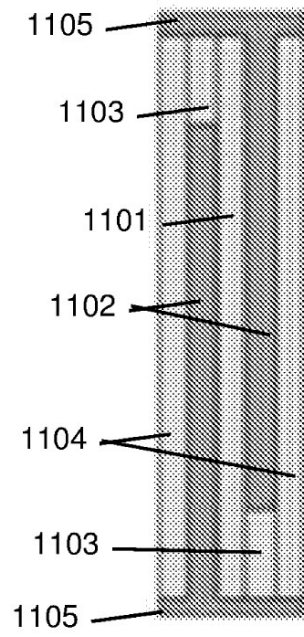


Figura 11

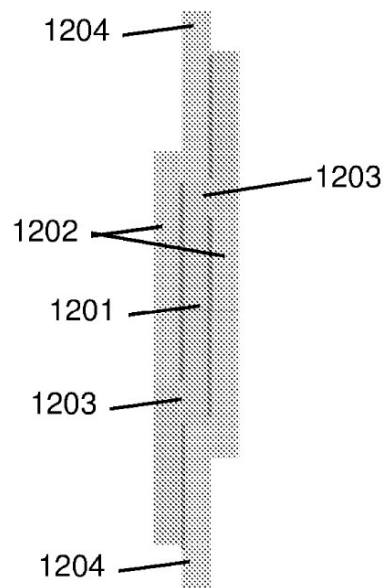


Figura 12

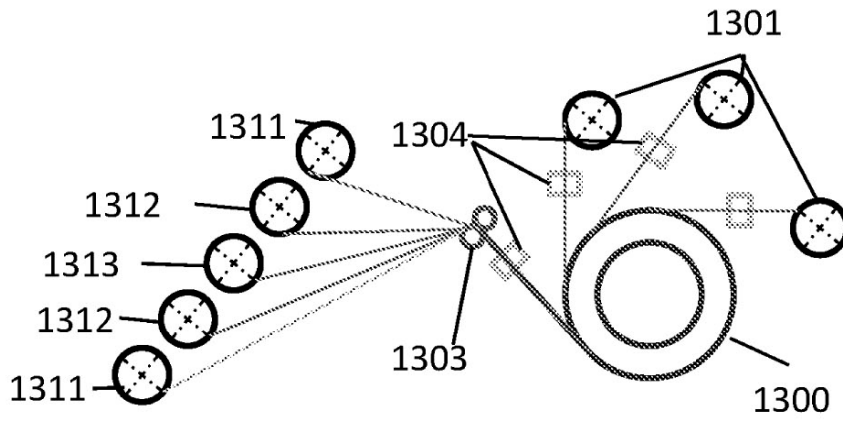


Figura 13

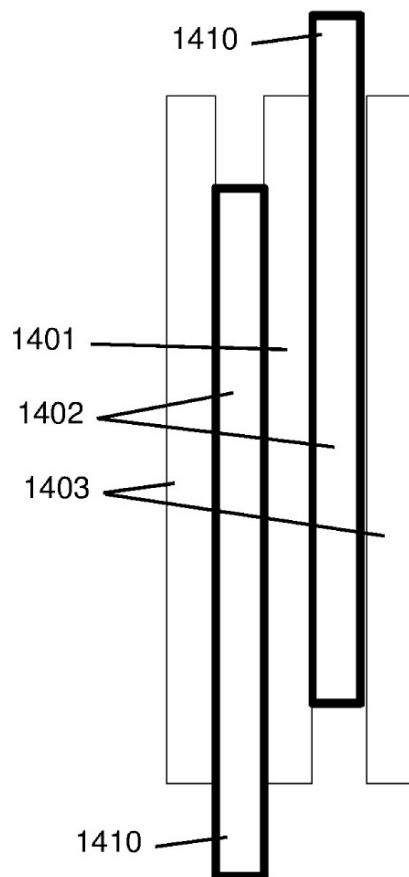


Figura 14

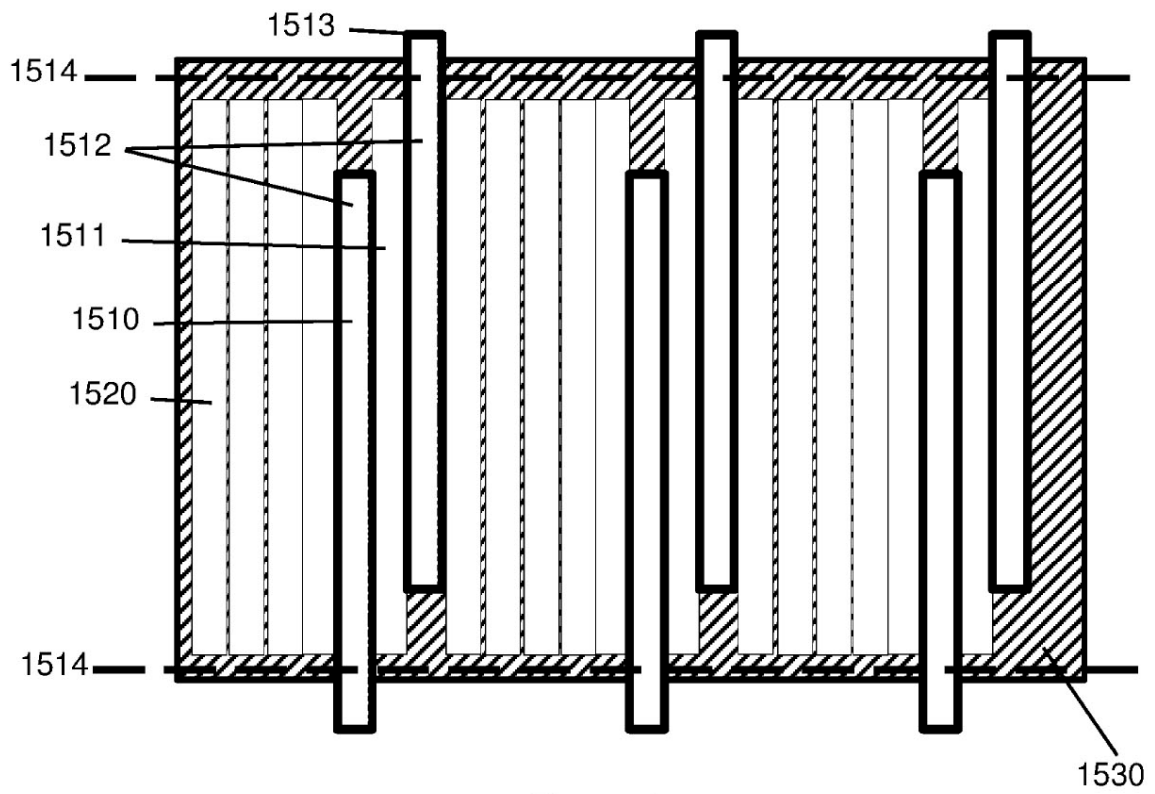


Figura 15

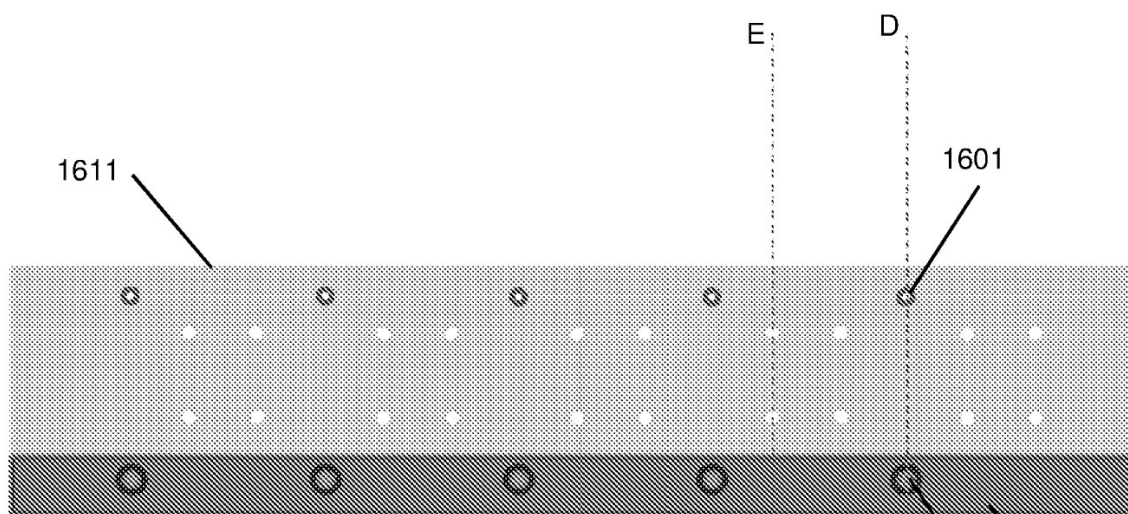


Figura 16A

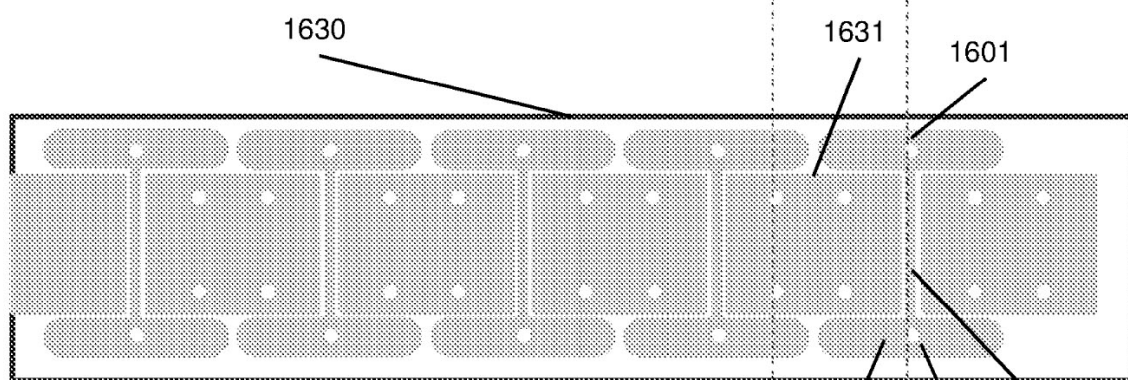


Figura 16B

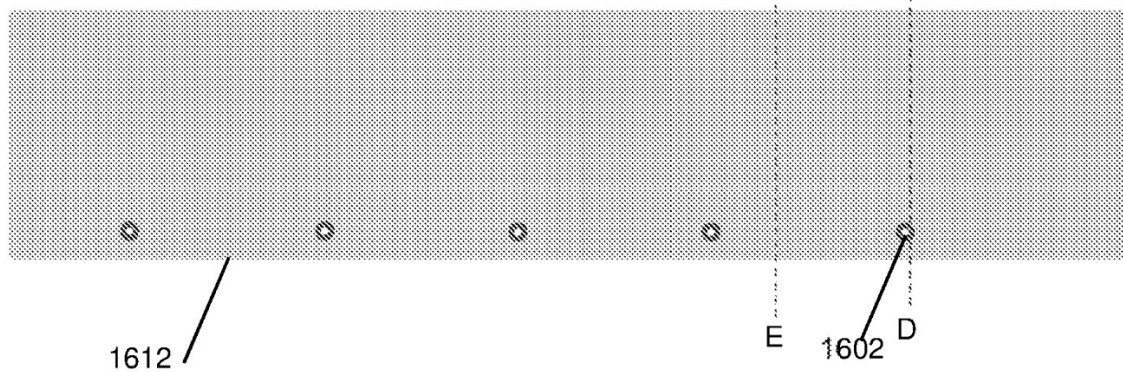


Figura 16C

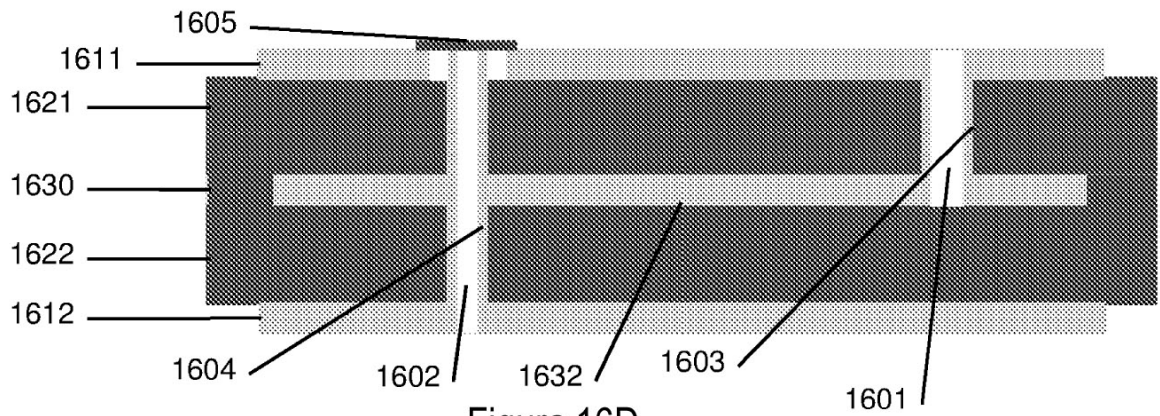


Figura 16D

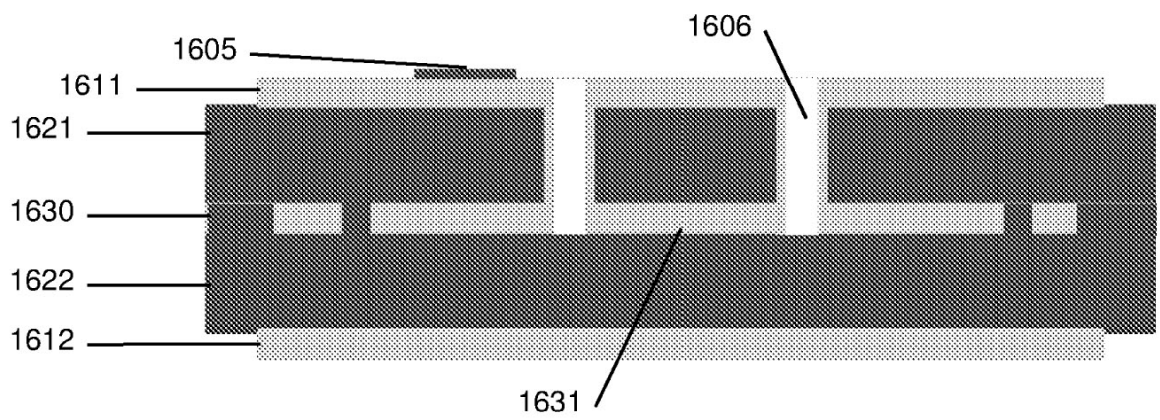


Figura 16E