

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 971 342**

51 Int. Cl.:

H01F 6/02 (2006.01)

H01F 6/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.11.2020** **PCT/EP2020/081677**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.05.2021** **WO21094333**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.11.2020** **E 20806950 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.01.2024** **EP 4059033**

54 Título: **Detección del enfriamiento rápido basado en la tensión o en el campo magnético**

30 Prioridad:

12.11.2019 GB 201916454

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

04.06.2024

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

SLADE, ROBERT y
BATEMAN, ROD

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 971 342 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

Detección del enfriamiento rápido basado en la tensión o en el campo magnético

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a la detección del enfriamiento rápido en sistemas de imanes superconductores de alta temperatura y, en particular, a métodos de detección del enfriamiento rápido y sistemas de imanes configurados para implementar los métodos.

10 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 aún resultados comparables con los mejores tokamaks que operan actualmente, como el JET.

La investigación mundial sobre fusión ha entrado en una nueva fase después del comienzo de la construcción del ITER, el tokamak más grande y caro (alrededor de 15.000 millones de euros) jamás construido. La ruta exitosa hacia un reactor de fusión comercial exige una operación estable de pulso largo combinada con la alta eficiencia requerida para hacer económica la producción de electricidad. Estas tres condiciones son especialmente difíciles de lograr simultáneamente, y el programa planificado requerirá muchos años de investigación experimental en el ITER y otras instalaciones de fusión, así como la 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.

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

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 del 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 pequeño diámetro es una necesidad, lo que presenta desafíos para el diseño del imán de confinamiento de plasma. Las bobinas de campo de superconductores de alta temperatura (HTS) son una tecnología prometedora para tales imanes.

Los materiales superconductores se dividen típicamente en "superconductores de alta temperatura" (HTS) y "superconductores de baja temperatura" (LTS).

Los materiales LTS, tales como Nb y NbTi, son metales o aleaciones de metales cuya superconductividad puede ser descrita por la teoría BCS. Todos los superconductores de baja temperatura tienen una temperatura crítica (la temperatura por encima de la que el material no puede ser superconductor incluso en un campo magnético cero) por debajo de aproximadamente $-243,15^{\circ}\text{C}$ (30°K). La teoría BCS no describe el comportamiento del material HTS, y tales materiales pueden tener temperaturas críticas por encima de aproximadamente $-243,15^{\circ}\text{C}$ (30°K) (aunque debe tenerse en cuenta que son las diferencias físicas en la operación y composición de superconducción, en lugar de la temperatura crítica, lo que definen el material HTS y LTS). Los HTS más comúnmente usados son los "superconductores de cuprato": cerámicas basadas en cupratos (compuestos que contienen un grupo de óxido de cobre), tales 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).

ReBCO normalmente se fabrica como cintas, con una estructura como la que se muestra en la Figura 1. Tal cinta tiene generalmente un espesor de aproximadamente 100 micrómetros e incluye un sustrato 101 (normalmente Hastelloy electropulido de aproximadamente 50 micrómetros de espesor), en el que se deposita por IBAD, pulverización catódica con magnetron u otra técnica adecuada una serie de capas intermedias conocidas como la 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 intermedia, y normalmente tiene un espesor de 1 micrómetro. Se deposita una capa de plata 104 de 1-2 micrómetros sobre la capa de 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 estructura principal mecánica que se puede alimentar a través de la línea de fabricación y permite el crecimiento de capas posteriores. Se requiere que la pila intermedia 102 proporcione una plantilla cristalina biaxialmente texturizada sobre la que hacer crecer la capa de HTS, y evita la difusión química de elementos del sustrato al HTS que dañan sus propiedades superconductoras. Se requiere la capa de plata 104 para proporcionar una interfaz de baja resistencia del 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 (entre al estado "normal").

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

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

Un tipo común de bobina de HTS es una "bobina de panqueque", donde los cables HTS 201 se enrollan para formar una bobina plana, de manera similar a un carrete de cinta. Las bobinas de panqueque pueden fabricarse con un perímetro interior que tiene cualquier forma bidimensional. A menudo, las bobinas de panqueque se proporcionan como una "bobina de panqueque doble", que comprende dos bobinas de panqueque enrolladas en sentido opuesto, con aislamiento entre las bobinas de panqueque y con los terminales internos conectados entre sí. Esto significa que solo es necesario suministrar tensión a los terminales externos, que generalmente son más accesibles, para conducir la corriente a través de las espiras de la bobina y generar un campo magnético.

Las bobinas de HTS pueden estar "aisladas", con material eléctricamente aislante entre las espiras de la bobina, o "no aisladas", donde las espiras de la bobina están conectadas eléctricamente de forma radial, así como a lo largo de los cables (por ejemplo, conectando las capas estabilizadoras de cobre de los cables mediante soldadura o por contacto directo). De forma adicional, las bobinas pueden estar "parcialmente aisladas", es decir, tener una capa entre las bobinas con una resistencia intermedia entre los aisladores utilizados para una bobina aislada, o los metales que unen los cables de una bobina no aislada. Por ejemplo, el aislamiento parcial puede ser una capa más gruesa de un metal de resistencia relativamente alta, o un semiconductor, o una capa compuesta construida para proporcionar una resistencia relativamente alta. Como alternativa, se pueden formar bobinas parcialmente aisladas proporcionando otras trayectorias de corriente radiales hechas de material conductor, p. ej., en el lado de la bobina de campo.

El documento US2019252104A1 divulga un método para detectar el inicio de un enfriamiento rápido en una bobina de campo para un tokamak que se basa en la detección de cambios locales de temperatura o tensión en la bobina de campo.

El documento CN110261799A divulga un método para detectar el inicio de un enfriamiento rápido en una bobina de campo basándose en la detección de cambios locales en la tensión.

Los documentos US2010254047A1 y EP2755216A1 divulgan, cada uno, un método para detectar el inicio de un enfriamiento rápido en una bobina de campo que se basa en la detección de cambios locales en el campo magnético medido dentro de la bobina de campo.

Sumario

De acuerdo con un primer aspecto, se proporciona un método para detectar condiciones de enfriamiento rápido previas en un imán superconductor que comprende una bobina de campo HTS como se define en la reivindicación independiente 1.

De acuerdo con un segundo aspecto, se proporciona un sistema de imán de superconductores de alta temperatura, HTS, que comprende una bobina de campo HTS como se define en la reivindicación independiente 4.

De acuerdo con un tercer aspecto, se proporciona un tokamak que comprende un sistema de imán HTS de acuerdo con el segundo aspecto, en donde una bobina de campo toroidal o bobina de campo poloidal del tokamak comprende la bobina de campo HTS.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama esquemático de una cinta HTS;
la figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema de imán superconductor;

la figura 3 es un diagrama esquemático de un sistema de imán superconductor que comprende varias bobinas.

Descripción detallada

- 5 Las bobinas parcialmente aisladas y no aisladas, es decir, las bobinas en las que hay una trayectoria conductora (no superconductora) entre espiras que permite que la corriente fluya radialmente entre espiras, son generalmente resistentes al enfriamiento rápido (el imán se vuelve no superconductor durante la operación) y al daño durante el enfriamiento rápido (ya que esto se debe en parte a la formación de arcos entre las espiras en una bobina aislada). Sin embargo, se ha descubierto que pueden producirse daños significativos por enfriamientos rápidos en bobinas
- 10 parcialmente aisladas y no aisladas debido a los grandes cambios en el campo magnético y la tensión resultante que se produce por la transferencia de corriente desde la trayectoria en espiral (es decir, en el HTS de la bobina) a la trayectoria radial (es decir, directamente a través de la conexión metálica o el aislamiento parcial). Esto es particularmente notable en sistemas de imanes con múltiples secciones de bobina, p. ej., los conjuntos de bobinas de campo toroidal (TF) para tokamaks. Si una "extremidad" de la bobina de TF se sufre enfriamiento rápido, entonces el
- 15 desequilibrio magnético resultante puede causar un daño significativo a todo el conjunto de bobinas de TF debido a las grandes fuerzas desequilibradas.

Mientras que los grandes cambios destructivos de tensión y campo magnético son claramente un problema, la siguiente descripción propone usar la tensión y los cambios de campo más pequeños que se producen durante el

20 inicio de un enfriamiento rápido debido al intercambio de corriente entre espiras para detectar el enfriamiento rápido incipiente y proporcionar suficiente advertencia para reducir de forma segura el imán y reducir o evitar el daño causado por el enfriamiento rápido. Por lo general, la detección del enfriamiento rápido implica detectar las "condiciones previas al enfriamiento rápido", es decir, las condiciones que es probable que provoquen un enfriamiento rápido o signos tales como el intercambio de corriente entre las bobinas o puntos calientes dentro de las bobinas que indican que puede

25 producirse un enfriamiento rápido pronto.

La detección de enfriamiento rápido puede realizarse monitorizando cualquiera o ambas de la tensión en cada bobina del conjunto (y/o en componentes estructurales cercanos) o el campo magnético cerca de cada bobina en el conjunto. En un ejemplo amplio, las condiciones de enfriamiento rápido previas pueden señalizarse cuando hay cualquier

30 desviación (por ejemplo, mayor que la precisión de medición de las galgas extensométricas utilizadas) de las mediciones esperadas durante la operación del imán. Como alternativa, las condiciones de enfriamiento rápido previas pueden señalizarse cuando cualquier desviación de este tipo es mayor que un umbral (por ejemplo, un 1 % mayor que la medición esperada). Esto sería adecuado para un sistema en el que vale la pena soportar el coste potencial de un mayor número de paradas innecesarias para ahorrar los costes potenciales de un enfriamiento rápido incontrolado.

35 Como alternativa, el sistema de protección contra el enfriamiento rápido podría configurarse para responder solo a ciertas mediciones realizadas por los sensores de tensión y/o campo, por ejemplo, a un campo magnético perpendicular al campo magnético de la bobina durante las operaciones normales (un campo "fuera del eje"), o a deformarse en un componente inesperado o en una dirección inesperada (donde "inesperado" significa "no se esperaba durante el funcionamiento normal", es decir, puede esperarse en el caso de unas condiciones de enfriamiento o preenfriamiento rápido).

40

En sistemas de múltiples bobinas, la detección de las condiciones de enfriamiento rápido previas en una bobina puede basarse en cambios en la tensión en y alrededor de otra bobina del sistema; esto se debe a que los cambios en el

45 campo magnético de la primera bobina provocarán cambios en el equilibrio de fuerzas en las otras bobinas del sistema. Esto se aplica si las múltiples bobinas son parte del mismo imán (por ejemplo, las extremidades individuales de un conjunto de bobinas de TF).

El juicio de "tensión/campo durante el funcionamiento normal" puede basarse en la potencia que se suministra actualmente a la bobina, p. ej. el sistema de protección contra el enfriamiento rápido puede recibir como entrada los

50 detalles de la corriente suministrada a cada bobina, determinar un modelo de tensión y/o campo sobre la base de estas corrientes (por ejemplo, por referencia a una tabla de consulta o mediante cálculo en un modelo simple), y comparar las lecturas de los sensores de tensión y/o campo con la tensión y/o de modelo de campo. Como se ha indicado anteriormente, las condiciones de enfriamiento rápido previas pueden señalizarse (y los procedimientos de prevención de enfriamiento rápido, tales como la reducción gradual del imán acoplado) para cualquier desviación

55 significativa del modelo o para desviaciones de ciertos tipos, p. ej. perpendicular al campo/tensión esperado.

En un sistema equilibrado de múltiples bobinas, es decir, un sistema en el que el patrón de tensión/campo magnético debe ser el mismo para cada bobina durante el funcionamiento normal, la tensión/campo magnético esperado durante

60 el funcionamiento normal que se usa para la comparación puede basarse en la tensión/campo magnético medido de las otras bobinas, es decir, el patrón de tensión esperado es que la tensión en cada bobina sea idéntica dentro del intervalo de precisión del calibre. Un patrón particular de desviaciones en la tensión puede indicar condiciones previas al enfriamiento rápido, p. ej., donde hay desviaciones iguales y opuestas en las dos bobinas a cada lado de una bobina, con desviaciones iguales y opuestas reducidas en los siguientes adyacentes más cercanos.

65 Se aplican consideraciones similares a los sistemas que no están completamente equilibrados, pero tienen simetría;

p. ej., donde un sistema de múltiples bobinas tiene dos conjuntos de bobinas que tienen simetría reflectante entre sí, la tensión/campo magnético esperado puede basarse en la tensión/campo magnético medido de cada bobina, con la expectativa de que el patrón de tensión/campo magnético también debería tener simetría reflectante.

- 5 En una bobina TF típica de un tokamak esférico pequeño (radio principal de plasma de aproximadamente 1,5 m), la tensión esperada puede ser de hasta el 0,25 % (2500 microtensión) y la sensibilidad de los sensores de tensión puede ser mejor que un 0,01 de microtensión. Como tal, es posible la determinación de alta resolución muy precisa de la tensión en el imán.
- 10 La figura 2 muestra un sistema de imán superconductor ilustrativo que puede no usarse para llevar a cabo la presente invención, en forma esquemática. El sistema de imán comprende:
 - una bobina de campo HTS 201, que tiene estructuras de soporte 202;
 - una pluralidad de sensores de tensión 203 en la bobina de campo HTS 201 y las estructuras de soporte 202;
 - 15 una pluralidad de sensores de campo magnético 204 colocados para monitorizar el campo magnético producido por la bobina de campo HTS 201;
 - un sistema de protección de enfriamiento rápido 205 configurado para:
 - monitorizar las mediciones de los sensores de tensión y los sensores de campo magnético;
 - 20 comparar las mediciones monitorizadas con un perfil de tensión esperado durante la operación normal y un perfil de campo magnético esperado durante la operación normal;
 - determinar si la bobina de campo está o no en condiciones de preenfriamiento rápido basándose en esa comparación.
- 25 La figura 3 muestra un sistema de imán de múltiples bobinas que puede usarse para llevar a cabo la presente invención, que comprende una pluralidad de bobinas 201 como se muestra en la figura 2 (con estructuras de soporte 202 asociadas y sensores 203, 204). El sistema de protección contra el enfriamiento rápido 305 está configurado para:
 - monitorizar las mediciones de los sensores de tensión y los sensores de campo magnético;
 - 30 comparar las mediciones monitorizadas con un perfil de tensión esperado durante la operación normal y un perfil de campo magnético esperado durante la operación normal;
 - determinar si cada bobina de campo está o no en condiciones de preenfriamiento rápido basándose en esa comparación, usando tanto los sensores en cada bobina de campo como los sensores en las otras bobinas de campo.
- 35 Como se ha explicado en los ejemplos más detallados anteriores, el sistema de imán también podría construirse solo con sensores de tensión o solo con sensores de campo magnético, y con el sistema de protección de enfriamiento rápido configurado para considerar solo la tensión o el campo magnético (según sea apropiado). El sistema de protección contra el enfriamiento rápido puede configurarse adicionalmente para activar alguna forma de prevención o mitigación del enfriamiento rápido después de una determinación de que la bobina de campo está en condiciones
- 40 de preenfriamiento rápido, p. ej., para desencadenar el vertido de la corriente del imán a una masa fría, tal como cambiando a una carga resistiva o sometiendo a enfriamiento rápido de forma deliberada a una gran parte del imán.

REIVINDICACIONES

1. Un método de detección de condiciones que probablemente provoquen un enfriamiento rápido en un imán superconductor que comprende una pluralidad de bobinas de campo HTS (201), comprendiendo cada bobina de campo:
una pluralidad de espiras que comprenden material HTS y estabilizador metálico; y
un material conductor que conecta las espiras de modo que la corriente pueda compartirse radialmente entre las espiras a través del material conductor;
comprendiendo el método:
monitorizar la tensión y/o un campo magnético de cada bobina de campo HTS;
comparar la tensión y/o el campo magnético monitorizados de cada bobina de campo de HTS con la tensión y/o el campo magnético monitorizados de al menos otra bobina de campo de HTS de la pluralidad de bobinas de campo de HTS;
en respuesta a dicha comparación, para determinar si es probable que una o más de las bobinas de campo HTS se enfríen rápidamente.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde determinar si es probable que una o más de las bobinas de campo HTS se enfríen rápidamente comprende una o más de:
determinar que es probable que una de las bobinas de campo de HTS se enfríe rápidamente si la tensión o el campo magnético monitorizado difiere de la tensión o el campo magnético de al menos otra bobina de campo de HTS en más de un valor umbral;
determinar que es probable que una de las bobinas de campo de HTS se enfríe rápidamente si la tensión o el campo magnético monitorizado tiene un componente perpendicular a la tensión o el campo magnético de al menos otra bobina de campo de HTS con una magnitud mayor que un valor umbral.
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, en donde el o cada valor umbral es una proporción predeterminada de la tensión o campo magnético de la al menos otra bobina de campo HTS.
4. Un sistema de imán de superconductor de alta temperatura, HTS, que comprende una pluralidad de bobinas de campo HTS (201), comprendiendo cada bobina de campo HTS:
una pluralidad de espiras que comprenden material HTS y estabilizador metálico;
un material conductor que conecta las espiras, de modo que la corriente pueda compartirse entre espiras a través del material conductor;
comprendiendo además el sistema de imán HTS un sistema de protección de enfriamiento rápido (305) y una pluralidad de sensores (203, 204) que comprenden:
uno o más sensores de tensión (203) ubicados en cada bobina de campo de HTS o en un soporte estructural (202) de cada bobina de campo de HTS, y/o
uno o más sensores de campo magnético (204) configurados para monitorizar el campo magnético de cada bobina de campo HTS;
en donde el sistema de protección contra el enfriamiento rápido está configurado para:
monitorizar las mediciones de tensión y/o campo magnético para cada bobina de HTS usando la pluralidad de sensores;
comparar las mediciones de tensión y/o campo magnético para cada bobina de HTS con las mediciones de tensión y/o campo magnético de al menos otra bobina de campo de HTS de la pluralidad de bobinas de campo de HTS;
en respuesta a dicha comparación, determinar si es probable que una o más de las bobinas de campo HTS se enfríen rápidamente.
5. Un sistema de imán HTS de acuerdo con la reivindicación 4, en donde el material conductor está contenido dentro de una capa parcialmente aislante que comprende cualquiera de:
una capa intermitente de aislamiento;
un semiconductor;
una tira de metal que tiene una capa intermitente de aislamiento en cada lado; y
un material de transición metal-aislante.
6. Un tokamak que comprende un sistema de imán HTS de acuerdo con la reivindicación 4 o 5, en donde la pluralidad de bobinas de campo HTS son bobinas de campo toroidales del tokamak.

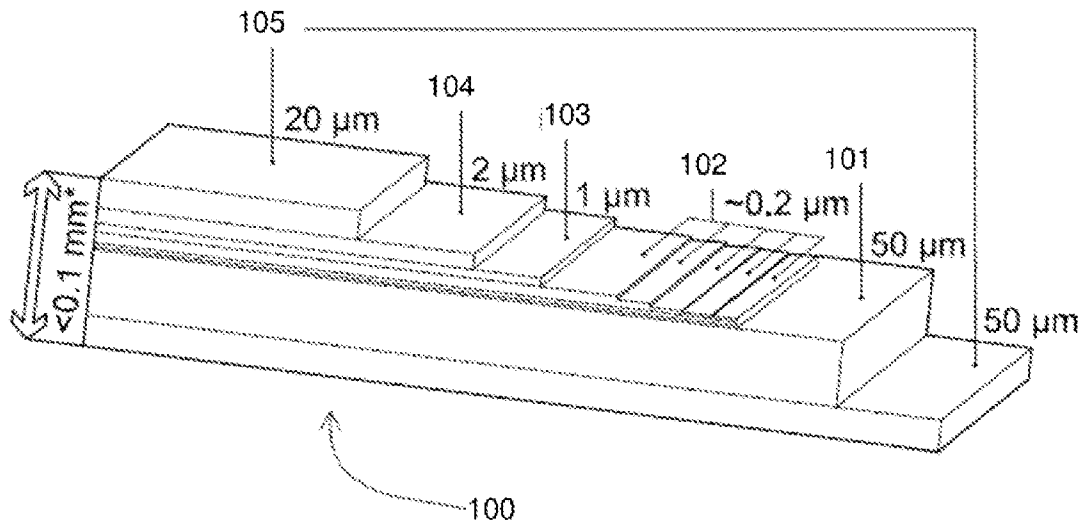


Figura 1

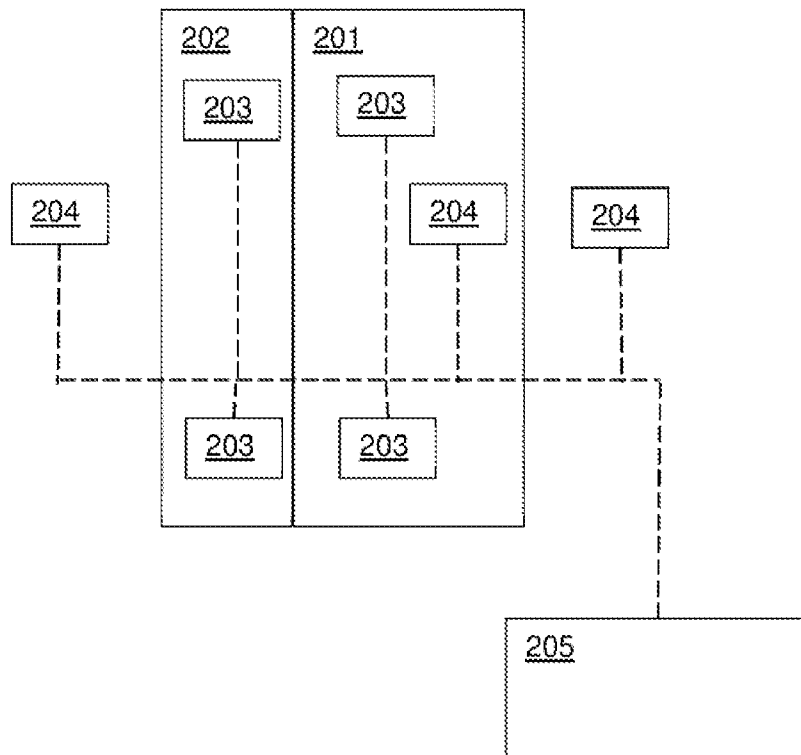


Figura 2

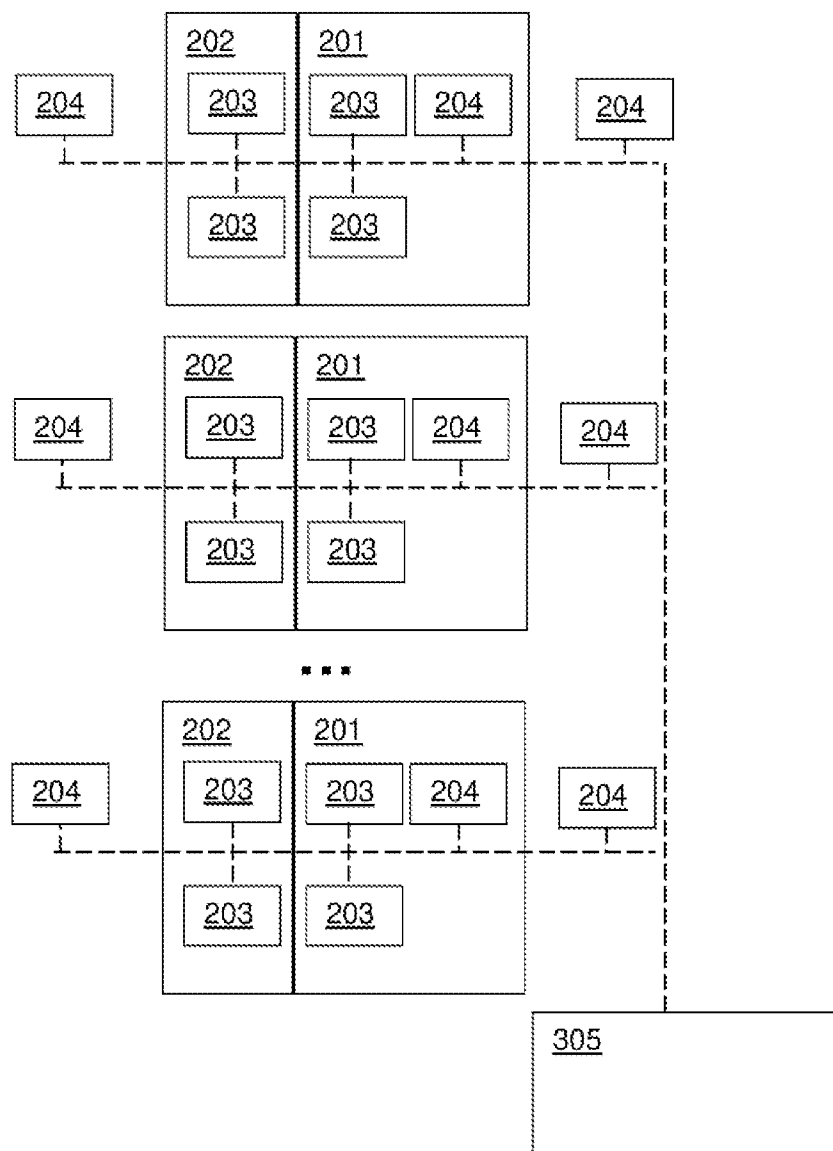


Figura 3