

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 403 095**

51 Int. Cl.:

H01L 39/16 (2006.01)

H01L 39/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.11.2008** **E 10192011 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.01.2013** **EP 2302710**

54 Título: **Limitador de corriente de falla con una pluralidad de elementos de superconducción, y al menos uno con un contacto eléctrico entre su película superconductora y su sustrato eléctricamente conductor**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.05.2013

73 Titular/es:

ALSTOM TECHNOLOGY LTD. (50.0%)
Brown Boveri Str. 7
5400 Baden, CH y
BRUKER HTS GMBH (50.0%)

72 Inventor/es:

MUMFORD, FRANCIS JAMES y
USOSKIN, ALEXANDER

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Nuria

ES 2 403 095 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

Limitador de corriente de falla con una pluralidad de elementos de superconducción, y al menos uno con un contacto eléctrico entre su película superconductora y su sustrato eléctricamente conductor.

5 La invención se refiere a un limitador de corriente de falla, con un dispositivo superconductor que comprende una secuencia de elementos de superconducción, cada uno de los cuales posee:

- un sustrato eléctricamente conductor,
- una película superconductora, y
- una capa intermedia eléctricamente aislante proporcionada entre el sustrato y la película superconductora,

10 en el que las películas superconductoras de elementos de superconducción adyacentes de la secuencia están conectadas eléctricamente, en particular en serie,

en el que el sustrato eléctricamente conductor de cada elemento de superconducción de la secuencia está aislado eléctricamente de cada sustrato eléctricamente conductor de los elementos de superconducción adyacentes dentro de la secuencia cuyas películas superconductoras están conectadas eléctricamente en serie con la película superconductora de dicho elemento de superconducción.

15 Un dispositivo superconductor de ese tipo es conocido a partir del documento US 7.071.148 B1.

Los limitadores de corriente de falla de superconducción se utilizan para limitar el flujo de corriente a través del lado de carga de un circuito eléctrico en caso de cortocircuito en el lado de carga. En el caso más simple, el limitador de corriente de falla comprende un dispositivo superconductor conectado en serie con la carga. El dispositivo superconductor puede transportar una corriente con pérdidas muy bajas. Siempre que la corriente a través del dispositivo superconductor no exceda la corriente crítica, el dispositivo superconductor es prácticamente invisible dentro de la circuitería eléctrica, y es la característica de la carga, en particular la resistencia, la que determina la corriente a través del circuito eléctrico.

20 En caso de que la resistencia de la carga caiga (es decir, exista un cortocircuito dentro de la carga), la corriente del circuito se incrementa, y eventualmente excede la corriente crítica. En ese caso, el dispositivo superconductor se extingue (es decir, se vuelve un conductor normal), lo que da como resultado una resistencia óhmica alta del dispositivo superconductor. Como resultado, la corriente en el circuito eléctrico cae consiguientemente, y la carga queda protegida frente a una alta corriente eléctrica.

25 El material superconductor de un dispositivo superconductor debe ser enfriado hasta una temperatura baja con el fin de que alcance el estado de superconducción. Con el fin de facilitar y reducir los costes del enfriamiento, se pueden usar materiales superconductores de alta temperatura (materiales HTS). Los materiales HTS tienen una temperatura crítica por encima de una temperatura de 30 °K, y con frecuencia pueden ser enfriados con nitrógeno líquido (LN2).

30 Se conoce un limitador de corriente de falla con un dispositivo de superconducción que utiliza materiales HTS a partir del documento US 5.986.536. Éste comprende varios elementos de superconducción, cada uno de los cuales comprende una película de HTS depositada sobre un sustrato eléctricamente aislante (dieléctrico), realizado en particular con un material que permite el crecimiento texturado de la película de HTS, tal como ZrO₂ estabilizado con itrio, con una delgada intercapa de Ag. Los elementos de superconducción, es decir sus películas de HTS, están conectados en serie.

35 Los limitadores de corriente de falla de este tipo que comprenden elementos de superconducción con películas de superconducción texturadas depositadas sobre un sustrato dieléctrico, son bastante caros de fabricar. Además, tales limitadores de corriente de falla tienen un tiempo de recuperación relativamente largo después de un evento de extinción.

40 El documento DE 2410148 A divulga un dispositivo de conmutación que comprende una pluralidad de placas de aluminio perforadas de una manera a modo de meandro, estando las placas recubiertas con películas superconductoras y disponiendo de capas de óxido de aluminio entre las mismas. Las capas de superconducción de placas contiguas están conectadas en serie por medio de contactos sobresalientes.

45 El documento US 7.071.148 B1 describe un artículo superconductor unido, en el que dos segmentos contiguos y orientados de manera similar, comprendiendo cada uno de ellos un sustrato a base de metal, una capa de separación y un recubrimiento superconductor, están conectados eléctricamente a través de un tercer segmento opuesto, dispuesto sobre la parte superior de los dos segmentos.

50 **Objeto de la invención**

El objeto de la invención consiste en introducir un limitador de corriente de falla que sea barato de fabricar, y que

esté capacitado para un tiempo de recuperación corto después de un evento de extinción.

Breve descripción de la invención

Este objeto ha sido alcanzado, de acuerdo con la invención, por medio de un limitador de corriente de falla según se ha introducido en el encabezamiento de la descripción, caracterizado porque al menos uno de los elementos de superconducción comprende un contacto eléctrico entre su película superconductora y su sustrato eléctricamente conductor a través de su capa aislante, en el que el contacto eléctrico está situado básicamente en el centro entre las regiones en las que el elemento de superconducción está conectado eléctricamente al elemento de superconducción anterior y al siguiente.

De acuerdo con la invención, el limitador de corriente de falla (=FCL) es básicamente un dispositivo superconductor que comprende una pluralidad de elementos de superconducción; estos elementos de superconducción tienen, cada uno de ellos, una película superconductora, en particular una película de HTS, depositada sobre un sustrato eléctricamente conductor, en particular un sustrato metálico. La película superconductora y el sustrato eléctricamente conductor están (al menos en una gran extensión) aislados entre sí; a este efecto, existe una capa de aislamiento intermedia depositada entre el sustrato eléctricamente conductor y la película superconductora. Debe apreciarse que hilos superconductores basados en sustratos eléctricamente conductores con material HTS depositado sobre la parte superior, son ya conocidos, por ejemplo a partir del documento US 6.765.151.

Un elemento de superconducción basado en un sustrato eléctricamente conductor es mucho más barato de fabricar que un elemento de superconducción basado en un sustrato dieléctrico, en particular debido a que el coste del sustrato difiere en un factor de aproximadamente 50. Además, un sustrato eléctricamente conductor, típicamente un sustrato metálico, ofrece también una conducción térmica mucho mejor que un sustrato dieléctrico típico. Como consecuencia, después de un evento de extinción que típicamente calienta el elemento de superconducción por encima de la temperatura crítica del material de la película superconductora, puede ser enfriado de manera mucho más rápida de modo que el limitador de corriente de falla recupera el funcionamiento normal de forma mucho más rápida.

Como particularidad de la invención, el FCL del invento aplica una secuencia de elementos de superconducción, con sus películas superconductoras eléctricamente conectadas, y con sus sustratos eléctricamente conductores aislados entre sí. Este diseño innovador ha sido encontrado beneficioso para conseguir tanto una alta resistencia de falla, como una posible caída de tensión suficientemente alta (campo eléctrico) a través de la dirección de transporte de corriente, en particular ≥ 2 V/cm. Permitir que se consiga una resistencia de falla alta (es decir, la resistencia del limitador de corriente de falla en el modo de extinguido), y permitir que se consiga una caída de tensión alta, pueden ser considerados por lo tanto como objetivos adicionales de la presente invención.

Cuando el FCL del invento está en modo de falla, es decir, cuando la carga tiene un cortocircuito y las películas superconductoras se han extinguido, la tensión externa cae a través del limitador de corriente de falla, o más exactamente a través de las películas superconductoras ahora resistivas (conducción normal) en el interior del limitador de corriente de falla. Sin embargo, existe una trayectoria de desvío de corriente, ofrecida por los sustratos eléctricamente conductores de los elementos de superconducción cercanos. Si la tensión es suficientemente alta, esto puede causar una perforación desde una película superconductora, a través de una capa intermedia de aislamiento, hasta un sustrato eléctricamente conductor.

Si una trayectoria de desvío de corriente a través de los sustratos se vuelve activa, la resistencia de falla del limitador de corriente de falla caerá significativamente, y la corriente de falla a través del FCL se incrementará, poniendo en peligro la carga que ha de ser p0rotegida. Además, el calentamiento óhmico del FLC en caso de falla se incrementará, prolongando de ese modo el tiempo requerido para enfriar el FCL hasta por debajo de la temperatura crítica de sus películas superconductoras de nuevo. La disipación de calor en sí misma puede dañar también el material superconductor en el FCL, limitando de ese modo la máxima caída de tensión a través de la dirección de transporte de corriente.

Mediante la invención, los sustratos eléctricamente conductores de elementos de superconducción adyacentes (contiguos) conectados en serie están aislados entre sí. Como resultado, solamente una parte de la tensión externa cae a través de la longitud de un sustrato eléctricamente conductor, correspondiente básicamente a su fracción de la longitud global de las películas superconductoras conectadas en serie en el FCL. Así, mediante la separación según la invención de los sustratos eléctricamente conductores, se puede ajustar la caída de tensión a través de la longitud de un sustrato eléctricamente conductor puede, y en particular se puede reducir a un valor que excluya de manera segura una perforación a través de la capa de aislamiento. De acuerdo con la invención, no existe ahora en ninguna parte del dispositivo superconductor una diferencia de potencial del total de la tensión externa a través de la capa de aislamiento, sino solamente de una fracción de la tensión externa total, la cual no es suficiente para causar una perforación; entonces, la trayectoria de desvío de corriente a través del sustrato eléctricamente conductor se mantiene inactiva.

De acuerdo con la invención, al menos uno de los elementos de superconducción comprende un contacto eléctrico entre su película superconductora y su sustrato eléctricamente conductor a través de su capa intermedia (aislante),

en el que el contacto eléctrico está situado básicamente en el centro entre las regiones en las que el elemento de superconducción está conectado eléctricamente a un elemento de superconducción previo y a uno siguiente. Con este medio, la caída de tensión a través de la capa intermedia aislante puede reducirse más, especialmente a la mitad. Se debe apreciar que el contacto eléctrico se deberá extender, según la dirección de flujo de la corriente, solamente a una pequeña distancia (en comparación con la longitud del elemento de superconducción), con el fin de que no ofrezca una trayectoria de desvío de corriente sobre una longitud significativa ya que ello reduciría la resistencia de falla.

De ese modo, en el FCL de la invención, mientras se conserva el modo de falla, se puede mantener una alta resistencia del superconductor, y el calentamiento por efecto Joule puede ser mantenido bajo. Esto último reduce el tiempo de recuperación del FCL tras un evento de extinción, y permite una caída de tensión más alta a través de las películas superconductoras sin riesgo de dañar el material superconductor.

Se debe apreciar que preferiblemente, de acuerdo con la invención, el sustrato eléctricamente conductor de cada elemento de superconducción de la secuencia está aislado eléctricamente de cada sustrato eléctricamente conductor de todos los elementos de superconducción dentro de la secuencia cuyas películas superconductoras están conectadas eléctricamente en serie con la película superconductora de dicho elemento de superconducción.

De acuerdo con la invención, el sustrato eléctricamente conductor es típicamente metálico, en particular en forma de cinta delgada con un espesor comprendido típicamente en la gama de entre 5 μm y 100 μm . La cinta delgada puede facilitar el enfriamiento de las películas superconductoras, puesto que éstas tienen una baja capacidad calorífica y tienen una buena conductividad del calor a través del sustrato, permitiendo en particular un enfriamiento de doble cara altamente eficiente de los elementos de superconducción desde el lado superior y a través del lado del sustrato.

Las películas superconductoras conectadas eléctricamente de elementos de superconducción adyacentes, están típicamente conectadas por un medio de unión, en el que las películas superconductoras tienen partes de área superficial que no están cubiertas con el medio de unión ("parte de la superficie libre"). La parte de superficie libre puede estar comprendida en la gama, en particular, de un 10% a un 98% de la superficie de película global, y típicamente constituye la amplia mayoría de la superficie global de la película.

Se debe apreciar que un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla según la invención puede estar suplementado por otros elementos de superconducción adicionales de otros tipos distintos respecto a lo que se ha descrito anteriormente; sin embargo, no se hará más referencia a estos últimos.

El limitador de corriente de falla de la invención puede ser usado en un circuito eléctrico que comprende una fuente de tensión, en particular una planta de potencia o una red de suministro de energía, conectada en serie con una carga, en particular una subestación transformadora, y conectada en serie con el limitador de corriente de falla de la invención. La invención es particularmente adecuada para fuentes de alta tensión, con tensiones de 1000 V y superiores, en particular de 10 kV y superiores.

Realizaciones preferidas de la invención

En una realización preferida del limitador de corriente de falla de la invención, las películas superconductoras de al menos algunos elementos de superconducción adyacentes están conectadas eléctricamente de manera directa. Una conexión eléctrica directa es simple de realizar. Los medios conectados eléctricamente de forma directa, en particular sin ninguna sección de superconducción intermedia, están también incluidos. Los elementos de superconducción con películas superconductoras conectadas eléctricamente de forma directa son mencionados adicionalmente como elementos de superconducción conectados eléctricamente de forma directa.

En un desarrollo adicional preferido de esta realización, los elementos de superconducción adyacentes conectados eléctricamente de forma directa están:

- orientados de modo que sus películas superconductoras se enfrentan entre sí, y
- desplazados entre sí, de tal modo que los elementos de superconducción adyacentes se solapan parcialmente en una región de solapamiento,

en donde, en la región de solapamiento, las películas superconductoras de los elementos de superconducción solapantes están conectadas eléctricamente entre sí. Esta disposición es simple de fabricar.

Otro desarrollo adicional preferido está caracterizado porque las películas superconductoras de los elementos de superconducción adyacentes conectados eléctricamente de forma directa están conectadas eléctricamente a través de una capa de un metal normalmente conductor. La interconexión de esta manera de las películas superconductoras, resulta simple y altamente fiable debido a un área de contacto relativamente grande, que incluye solamente un mínimo de interfaces. Típicamente, la capa de conexión presenta una estructura multicapa que comprende sub-capas transitorias y una capa central. Las sub-capas están formadas ya sea directamente sobre la superficie de la película superconductora o ya sea sobre la película superconductora ya recubierta con una capa de

protección muy fina de un metal. Su cometido es el de proporcionar una resistencia interfacial baja en relación con la película superconductora, así como asegurar una unión mecánica estable.

Estas sub-capas están hechas típicamente de un metal precioso o de una aleación de metales preciosos, incluyendo en particular el oro y/o la plata. Alternativamente, las sub-capas pueden ser a base de cobre o de aleaciones a base de cobre tal como Cu-Ag, Cu- Ag-In. Además, cada sub-capa puede comprender varias capas como por ejemplo una capa de "masa" de un metal precioso, y una segunda capa de cobre (depositada por ejemplo mediante chapeado galvánico). Adicionalmente, estas diversas capas pueden comprender también una capa final hecha, por ejemplo, de Ag o Au o de aleaciones metálicas. El cometido de la capa final es el de proporcionar la pasivación de la superficie frente a reacciones químicas con el fin de mejorar la calidad de la soldadura, y de ese modo conseguir una baja resistencia interfacial (por ejemplo $<10^{-7}$ Ohmios $\times$ cm²) en el interior de la conexión eléctrica.

La capa central puede comprender una soldadura que permita proporcionar una conexión de bajo coste de las películas superconductoras, alternativamente de las sub-capas depositadas sobre estas películas. Típicamente la soldadura es un metal de baja temperatura de fusión, por ejemplo In, Zn, Cd, Ga, Bi Ag o aleaciones a base de esos metales. Alternativamente, la capa central puede estar formada a modo de capa de difusión proporcionada a través de soldadura fría (bajo presión) o bien de difusión térmica (por ejemplo, a 400 °C en el caso de sub-capas de Ag).

Adicionalmente preferida es una realización en la que las películas superconductoras de al menos algunos elementos de superconducción adyacentes están conectadas eléctricamente por medio de un elemento puente,

en donde el elemento puente comprende una sección superconductora,

y en donde las películas superconductoras de los elementos de superconducción adyacentes conectadas eléctricamente por medio de un elemento puente están conectadas eléctricamente a la sección superconductora. El elemento puente y su sección superconductora permiten mayor libertad en cuanto a la interconexión de las películas superconductoras, en particular cuando los elementos de superconducción adyacentes (contiguos) con películas superconductoras conectadas en serie están separados por una distancia significativa. La resistencia entre las películas superconductoras conectadas, durante el funcionamiento normal, puede ser así mantenida baja. Los elementos de superconducción con películas superconductoras conectadas eléctricamente por medio de un elemento puente son mencionados además como elementos de superconducción conectados eléctricamente por medio de un elemento puente.

En un desarrollo adicional ventajoso de esta realización, los elementos de superconducción adyacentes conectados eléctricamente por medio de un elemento puente están:

- orientados de modo que sus películas superconductoras se enfrentan a la misma dirección,
- y dispuestos unos a continuación de otros, con un espacio de separación entre dos elementos de superconducción adyacentes,

en donde el elemento puente establece una conexión eléctrica de las películas superconductoras de los elementos de superconducción adyacentes a través del espacio de separación. El espacio de separación es una forma simple de aislamiento mutuo.

Otro desarrollo adicional preferido de la realización anterior está caracterizado porque el elemento puente comprende un sustrato dieléctrico, y la sección superconductora es una capa superconductora que cubre el sustrato dieléctrico,

porque la capa superconductora del elemento puente se enfrenta a las películas superconductoras de los elementos de superconducción adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento puente,

y porque el elemento puente se solapa, en particular se solapa parcialmente, con ambos elementos de superconducción adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento puente. Las conexiones son simples y altamente fiables debido a una gran área de contacto, solamente con un mínimo de interfaces establecidas.

En una realización preferida del limitador de corriente de falla de la invención, los elementos de superconducción están conectados según una configuración a modo de anillo. Tal conexión en forma de anillo debe ser considerada, en el caso de corrientes circulares, como una secuencia serie de elementos de superconducción. En particular, solamente dos elementos de superconducción pueden ser conectados a modo de anillo. Con preferencia, los sustratos respectivos de los elementos de superconducción en su conjunto están curvados para proporcionar una disposición en forma básicamente de anillo circular. Los dispositivos superconductores en forma de anillo (cortocircuitados) se utilizan en limitadores de corriente de falla inductivos (basados en transformador), en los que la carga esta conectada en serie con el lado primario, y el dispositivo superconductor en forma de anillo está unido al lado secundario del transformador para proteger el lado secundario en el modo normal. Los FCLs inductivos son particularmente adecuados para limitar corrientes de AC.

En otra realización preferida, los elementos de superconducción están conectados según una secuencia lineal. Esta realización es particularmente adecuada para limitar corrientes de DC, en particular en los que una alta tensión externa es dividida entre los elementos de superconducción de la secuencia lineal.

- 5 En una realización particularmente preferida, el limitador de corriente de falla se caracteriza porque la secuencia de elementos superconductores comprende al menos tres elementos de superconducción. En este caso, una tensión externa puede ser distribuida de manera más amplia. Esto es especialmente importante en caso de FCLs de tipos resistivos.

- 10 También dentro del alcance de la presente invención está comprendido un método para la producción de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla conforme a la invención según se ha descrito en lo que antecede, caracterizado porque cada elemento de superconducción está expuesto a una tensión aplicada transversalmente a través de la capa intermedia de modo que se inducen rupturas de corriente a través de la capa intermedia (aislamiento), en donde la exposición a la tensión se lleva a cabo hasta que todos los puentes de baja resistencia a través de la capa aislante se hayan quemado. El dispositivo superconductor puede ser usado como respuesta dentro de un limitador de corriente de falla, el cual es de bajo coste de fabricación, ofrece tiempos de recuperación cortos, y puede manejar tensiones internas altas. Mediante el procedimiento de quemado, el comportamiento aislante de la capa intermedia puede ser incrementado significativamente en cuanto a su posterior uso práctico. Obsérvese que la última etapa puede ser llevada a cabo antes o después de que los elementos de superconducción hayan sido conectados eléctricamente.

- 20 En una variante preferida del método de la invención, la tensión se aplica como rampa de tensión con una tensión que se incrementa gradualmente con el tiempo, en particular en donde la tensión se incrementa hasta su valor máximo durante un intervalo de tiempo de entre 0,3 segundos y 15 segundos. De esta manera, se queman los puentes de baja resistencia de manera secuencial, es decir, no de manera simultánea a modo de una “explosión”. Este procesamiento se controla mejor.

- 25 Con preferencia, la etapa de procesamiento en la que el elemento de superconducción (respectivamente, su capa intermedia) está expuesto a la tensión, se lleva a cabo con anterioridad a una etapa de procesamiento en la que se forma un contacto eléctrico entre la película superconductora y el sustrato eléctricamente conductor a través de la capa intermedia (aislante) de dicho elemento de superconducción. En otro caso, el contacto eléctrico puede ser dañado por exposición a la tensión.

- 30 Se pueden extraer otras ventajas de la descripción y de los dibujos que se incluyen. Las características mencionadas en lo que antecede y en lo que sigue, pueden ser usadas de acuerdo con la invención ya sea individualmente o ya sea colectivamente según una combinación cualquiera. Las realizaciones mencionadas no deben ser entendidas como una enumeración exhaustiva sino que, por el contrario, tienen carácter ejemplar para la descripción de la invención.

Dibujos

- 35 La invención se muestra en los dibujos:

La Figura 1 muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con conexión eléctrica directa de las películas superconductoras con una capa de contacto continua;

- 40 La Figura 2 muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla de la invención, con conexión eléctrica directa de las películas superconductoras con capas locales de contacto en las interfaces;

La Figura 3a muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con conexión eléctrica directa de las películas superconductoras, con extensas áreas superficiales libres de las películas superconductoras;

- 45 La Figura 3b es una vista esquemática en planta de un dispositivo superconductor de la Figura 3a;

La Figura 4 muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con conexión eléctrica de películas superconductoras por medio de elementos de puente;

- 50 La Figura 5 muestra una vista esquemática en planta de un dispositivo superconductor para un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con esquinas a 90° entre elementos de superconducción y elementos de puente;

La Figura 6 muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor en forma de anillo para un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con cuatro elementos de superconducción conectados directamente;

La Figura 7 muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor en forma de anillo de un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con dos elementos de superconducción conectados directamente, y

- 5 La Figura 7b muestra una vista esquemática en sección transversal de un dispositivo superconductor en forma de anillo de un limitador de corriente de falla a efectos de información general, con dos elementos de superconducción conectados a través de elementos de puente.

En las Figuras, se describen dispositivos superconductores para su uso en un limitador de corriente de falla, de las que la Figura 2 ilustra la invención en la que las capas aislantes tienen contactos eléctricos centrales.

- 10 La **Figura 1** muestra un dispositivo 1 superconductor, con una secuencia de tres elementos 2a, 2b, 2c superconductores mostrados en la Figura 1. Cada elemento 2a, 2b, 2c superconductor comprende un sustrato 3a, 3b, 3c eléctricamente conductor que con preferencia está hecho a partir de una cinta de metal; una capa intermedia, es decir una capa 4a, 4b, 4c aislante (dieléctrica), y una película 5a, 5b, 5c superconductora, con preferencia una película superconductora de HTS, y más preferiblemente una película de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. El espesor TH del sustrato es típicamente de 5 μm a 100 μm .

- 15 En un ejemplo concreto, los sustratos 3a, 3b, 3c son a base de acero inoxidable de CrNi, de 0,1 mm de espesor, 10 mm de anchura y 200 mm de longitud. Más en general, la longitud de los elementos superconductores (medidos en la dirección de flujo de la corriente) puede variar desde un tamaño de un milímetro a varios metros; en nuestras pruebas, se han usado desde 20 hasta 2000 mm dependiendo de la caída de tensión por unidad de longitud en elementos extinguidos (se consideraron en el ejemplo caídas de tensión desde 0,3 a 4 V/cm) y del espesor y la calidad de la capa intermedia (aislante). La capa intermedia, que comprende una capa de zirconio estabilizada con itrio, es de 1 a 5 μm de espesor en el ejemplo dado. El espesor de la película de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ es de 1,2 μm . Los elementos superconductores produjeron una corriente crítica de 320 A a -196 °C.

- 25 La película 5a superconductora del elemento 2a superconductor izquierdo está conectada eléctricamente a la película 5b superconductora del elemento 2b superconductor, el cual es el siguiente elemento superconductor de la conexión en serie de elementos 2a-2c de superconducción del dispositivo 1 superconductor. La película 5b superconductora del elemento 2b superconductor, a su vez, está conectada a la película 5c superconductora del elemento 2c superconductor, el cual es de nuevo el siguiente elemento superconductor conectado en serie. La conexión eléctrica se establece por medio de una capa 6 de conexión continua depositada sobre la parte superior del elemento 2b superconductor central. La capa de conexión comprende típicamente una estructura multicapa que a su vez comprende sub-capas transitorias y una capa central.

- 30 Las sub-capas están formadas sobre la superficie de la película superconductora ya recubierta con una capa de protección muy delgada (0,07 μm) de un metal precioso tal como Ag o Au. En el presente ejemplo particular, estas sub-capas comprenden también una segunda capa de Cu, de 1 μm de espesor, depositada mediante chapeado galvanico. Las sub-capas se proporcionan solamente en el interior del área superficial destinada a la protección, es decir, la superficie restante de los elementos de superconducción se mantiene libre de cualquier sub-fracción de la capa de conexión.

- 35 La capa central se ha proporcionado mediante soldadura que comprende uno o más de los metales del grupo de In, Sn, Zn, Cd, Bi o sus combinaciones. La temperatura de fusión de la soldadura fue de 100 a 200 °C. El espesor de la capa central en el ejemplo considerado puede variar entre 2 y 30 μm . La resistencia interfacial total de la capa de conexión proporcionada en este ejemplo está por debajo de 5×10^{-7} ohmios $\times \text{cm}^2$ medida a -196 °C, es decir, a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido.

- 40 Los elementos 2a, 2c superconductores están alineados en paralelo, y el elemento 2b superconductor está orientado de manera opuesta a los anteriores, de tal modo que su película 5b superconductora se enfrenta a las películas 5a, 5c superconductoras. Entre los elementos 2a y 2c superconductores existe un espacio de separación 7, lo que significa que los sustratos 3a y 3c eléctricamente conductores están aislados eléctricamente entre sí. Por consiguiente, los sustratos 3a, 3b, 3c eléctricamente conductores de todos los elementos 2a, 2b, 2c superconductores de la secuencia del dispositivo 1 superconductor están en este caso aislados entre sí, lo que se prefiere en general en la presente invención.

- 45 El espacio de separación 7 puede estar relleno de un aislador adicional (tal como, por ejemplo, resina epoxi o Teflón) con el fin de limitar la difusión de la soldadura metálica de la capa de conexión hacia el interior del espacio de separación, y evitar de ese modo la posibilidad de cortocircuitar los sustratos 3a y 3c eléctricamente conductores.

- 50 Además, con el fin de conseguir un nivel mejorado de aislamiento entre el sustrato y la película superconductora, cada elemento de superconducción ha sido pre-tratado mediante exposición a una tensión aplicada transversalmente a través de la capa intermedia de modo que se inducen perforaciones de corriente a través de la capa eléctricamente aislante, en donde la exposición a la tensión se lleva a cabo hasta que se queman todos los puentes de baja resistencia a través de la capa aislante. Una tensión de DC que puede variar entre 10 y 200 V, se

aplica entre la película superconductora y el sustrato eléctricamente conductor. La tensión es en forma de rampa lineal de una manera tal que la tensión máxima se alcanza dentro de 1-5 segundos; el valor máximo de tensión se determina con anterioridad al tratamiento como aproximadamente el 80% de la tensión de perforación medida en una capa eléctricamente aislante del mismo tipo, pero con estructura homogénea, es decir, sin puentes de baja resistencia. Todos los procesos relacionados con tales pre-tratamientos se realizan con preferencia en condiciones de temperatura ambiente. Con el enfriamiento de los elementos superconductores, crece típicamente la tensión máxima de perforación.

El dispositivo superconductor, durante su operación, se enfría por ejemplo con nitrógeno líquido (LN2), con preferencia desde ambos lados (parte inferior y parte superior), de modo que cada elemento de superconducción se enfría directamente desde el lado de la película superconductora, y a través del sustrato (los medios de enfriamiento no han sido mostrados).

En los dispositivos superconductores adicionales puestos de relieve entre la Figura 2 y la Figura 7 siguientes, se pueden aplicar las características y los procedimientos correspondientes, en particular con respecto al pre-tratamiento con tensión, a medios de enfriamiento y a rellenos aislantes del espacio de separación, a menos que se describa otra cosa.

La Figura 2 muestra un dispositivo 21 superconductor similar al dispositivo superconductor mostrado en la Figura 1. En este caso, las películas 5a, 5b superconductoras están conectadas por medio de una parte 6a de capa de conexión, y las películas 5b, 5c superconductoras están conectadas por medio de una parte 6b de capa de conexión. Las partes 6a, 6b de capa de conexión están separadas y por lo tanto aisladas eléctricamente entre sí, y están hechas de un metal normalmente conductor, en particular oro o plata. Las partes 6a, 6b de capa de conexión, por consiguiente, se extienden solamente por las regiones 22a, 22b de solapamiento de los elementos 2a, 2b, 2c superconductores. Las partes 23a, 23b, 23c de área superficial, que están libres de medios de unión (en este caso, libres de partes de capa de conexión eléctricamente conductora) ayudan a incrementar la resistencia del dispositivo 21 superconductor bajo una corriente de falla. Esto sigue al hecho de que la extinción se forma con preferencia en las porciones de los elementos superconductores que no están "desviados" mediante otro elemento de superconducción o elemento de puente.

En particular, en el dispositivo 21 superconductor de la Figura 2, las capas 4a, 4b, 4c aislantes tienen un contacto 24a, 24b, 24c eléctrico central, para limitar la caída de tensión a través de las capas 4a-4c aislantes.

Se debe apreciar que sobre la parte superior de las películas 5a-5c superconductoras, se puede depositar una capa de cobertura (o capa de protección) muy delgada de un metal conductor, en particular un metal noble tal como plata u oro. Sin embargo, el espesor de esta capa de cobertura debe ser suficientemente pequeño como para que no se establezca un desvío significativo de corriente con respecto a la película superconductora subyacente. Con preferencia, sin embargo, no se utiliza ninguna capa de cobertura.

La **Figura 3a** y la **Figura 3b** muestran un dispositivo 31 superconductor con una secuencia de cuatro elementos 2a-2d de superconducción conectados eléctricamente en serie, en sección transversal (Figura 3a) y en vista superior (Figura 3b). Los elementos 2a-2d de superconducción tienen una orientación alterna, con los elementos de superconducción adyacentes con sus películas 5a-5d superconductoras enfrentándose entre sí (obsérvese que las capas aislantes no han sido mostradas en este caso, por motivos de simplificación). En la vista superior de la Figura 3b, las regiones 22a, 22b, 22c de solapamiento pueden ser bien reconocidas. Éstas forman alrededor del 20% de la superficie global de las películas superconductoras, perteneciendo el otro 80% a las partes 23a-23d de superficie libre.

La **Figura 4** muestra un diseño alternativo de un dispositivo 41 superconductor, mostrando en este caso una secuencia de tres elementos 2a, 2b, 2c superconductores, con películas 5a, 5b, 5c superconductoras respectivas (de nuevo, las capas aislantes intermedias no han sido mostradas por razones de simplificación). Los elementos 2a-2c de superconducción están todos orientados de manera idéntica con sus películas superconductoras enfrentándose al mismo lado (en este caso, el lado superior), y están separados por espacios 45a, 45b.

Las películas 5a-5c superconductoras están conectadas eléctricamente por parejas en serie mediante elementos 42a, 42b de puente, comprendiendo cada uno de ellos un sustrato 43a, 43b dieléctrico (eléctricamente aislante) y una capa 44a, 44b superconductora, con preferencia una capa de película superconductora de alta temperatura (HTS). Los elementos 42a, 42b de puente se solapan con los elementos superconductores (respectivamente, las películas 5a-5c superconductoras) que los mismos conectan, en comparación con regiones 46 de solapamiento. En este ejemplo particular, los sustratos 43a, 43b dieléctricos están hechos ya sea de cerámica de zirconio estabilizada con itrio o ya sea de zafiro (Al_2O_3 monocristalino).

La **Figura 5** muestra una vista superior de un dispositivo 51 superconductor para ser usado en un limitador de corriente de falla. Existe una secuencia de seis elementos 2a-2f superconductores rectos orientados en paralelo, todos ellos con sus películas superconductoras enfrentadas hacia arriba. Mediante cinco elementos 42a-42e de puente unidos a la parte superior, los elementos 2a-2f superconductores (respectivamente, sus películas superconductoras) están conectados eléctricamente en serie. Los elementos 42a-42e de puente están orientados de

forma perpendicular a los elementos 2a-2f superconductores con el fin de hacer que el dispositivo 51 superconductor sea más compacto. Al principio y al final del dispositivo 51 superconductor (respectivamente, de la secuencia de elementos 2a-2f superconductores), existen dos pastillas 52a, 52b de metal, en particular pastillas de Cu, para las uniones externas, las cuales han sido depositadas galvánicamente sobre los elementos 2a y 2f superconductores.

- 5 Desde la Figura 1 a la Figura 5 se han mostrado secuencias lineales de elementos de superconducción. Desde la Figura 5 a la Figura 7 se muestran dispositivos de superconducción en forma de anillo, en particular para su uso en limitadores de corriente de falla de tipo inductivo (basados en transformador).

- 10 La **Figura 6** muestra un dispositivo 61 superconductor con elementos 2a, 2b, 2c, 2d superconductores dispuestos en forma de anillo. Cada uno de ellos tiene un sustrato 3a-3d eléctricamente conductor, y una capa 4a-4d aislante intermedia, y una película 5a-5d superconductora. Cada elemento 2a-2d superconductor está conectado eléctricamente de manera directa a su elemento 2a-2d superconductor adyacente anterior y siguiente, con la conexión eléctrica establecida únicamente entre las películas 5a-5d superconductoras, pero no entre los sustratos 3a-3d eléctricamente conductores. Los sustratos 3a-3d eléctricamente conductores del anillo están todos ellos eléctricamente aislados entre sí. Los elementos 2a-2d superconductores están curvados en general, a modo de arco circular.

15 La **Figura 7a** muestra un dispositivo 71 superconductor para un limitador de corriente de falla similar al mostrado en la Figura 5, pero comprendiendo solamente elementos 2a, 2b superconductores con conexión eléctrica directa de sus películas 5a, 5b superconductoras. Obsérvese que las capas aislantes intermedias no han sido mostradas por motivos de simplicidad.

- 20 La **Figura 7b** muestra un dispositivo 72 superconductor, que comprende dos elementos 2a, 2b superconductores, con sus películas 5a, 5b superconductoras conectadas eléctricamente a través de elementos 42a, 42b de puente. De nuevo, las capas aislantes intermedias no han sido mostradas por razones de simplicidad.

REIVINDICACIONES

1.- Limitador de corriente de falla, con un dispositivo (1; 21; 31; 41; 51; 61; 71; 72) superconductor que comprende una secuencia de elementos (2a-2f) superconductores, cada uno de ellos con:

- un sustrato (3a-3d) eléctricamente conductor;
- una película (5a-5d) superconductora, y
- una capa (4a-4c) intermedia eléctricamente aislante proporcionada entre el sustrato y la película superconductora,

en el que las películas (5a-5d) superconductoras de elementos (2a-2f) superconductores adyacentes de la secuencia están conectadas eléctricamente, en particular en serie,

en el que el sustrato (3a-3d) eléctricamente conductor de cada elemento (2a-2f) superconductor de la secuencia está aislado eléctricamente de cada sustrato (3a-3d) eléctricamente conductor de aquellos elementos (2a-2f) superconductores adyacentes de dentro de la secuencia cuyas películas (5a-5d) superconductoras están conectadas eléctricamente en serie con la película (5a-5d) superconductora de dicho elemento (2a-2f) superconductor,

caracterizado porque,

al menos uno de los elementos (2a-2f) superconductores comprende un contacto (24a-24c) eléctrico entre su película (5a-5d) superconductora y su sustrato (3a-3d) eléctricamente conductor a través de su capa (4a-4c) de aislamiento, en el que el contacto (24a-24c) eléctrico está situado básicamente en el centro entre las regiones donde el elemento (2a-2f) superconductor está conectado eléctricamente a un elemento (2a-2f) superconductor anterior y a uno siguiente.

2.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** las películas (5a-5d) superconductoras de al menos algunos de los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes están conectadas eléctricamente de forma directa.

3.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado porque** los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente de forma directa están:

- orientados de modo que sus películas (5a-5d) superconductoras se enfrentan entre sí, y
- desplazados unos contra otros, de tal modo que los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes se solapan parcialmente en una región (22a-22c) de solapamiento, en el que, en la región (22a-22c) de solapamiento, las películas (5a-5d) superconductores de los elementos (2a-2f) superconductores solapantes están conectadas eléctricamente.

4.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 ó 3, **caracterizado porque** las películas (5a-5d) superconductoras de los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes conectadas eléctricamente de forma directa están conectadas eléctricamente a través de una capa (6; 6a, 6b) de un metal normalmente conductor.

5.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** las películas (5a-5d) superconductoras de al menos algunos elementos (2a-2f) superconductores adyacentes están conectadas eléctricamente por medio de un elemento (42a-42e) de puente,

en el que el elemento (42a-42e) de puente comprende una sección superconductora,

y en el que las películas (5a-5d) superconductoras de los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes conectadas eléctricamente por medio de un elemento (42a-42e) de puente están ambas conectadas eléctricamente a la sección superconductora.

6.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 5, **caracterizado porque** los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio de un elemento (42a-42e) de puente están:

- orientados de modo que sus películas (5a-5d) superconductoras se enfrentan en la misma dirección,
- y dispuestos unos a continuación de otros, con un espacio de separación (45a, 45b) entre dos elementos (2a-2f) superconductores adyacentes,

en el que el elemento (42a-42e) de puente establece una conexión eléctrica de las películas (5a-5d) superconductoras de los elementos (2a-2f) superconductores adyacentes a través del espacio de separación (45a, 45b).

- 7.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con la reivindicación 5 ó 6, **caracterizado porque** el elemento (42a-42e) de puente comprende un sustrato (43a, 43b) dieléctrico, y la sección superconductora es una capa (44a, 44b) superconductora que cubre el sustrato (43a, 43b) dieléctrico,
- 5 porque la capa (44a, 44b) superconductora del elemento (42a, 42e) de puente se enfrenta a las películas (5a, 5d) superconductoras de los elementos (2a, 2f) superconductores adyacentes conectadas eléctricamente por medio del elemento (42a-42e) de puente,
- y porque el elemento (42a-42e) de puente se superpone, en particular se superpone parcialmente, con ambos elementos (2a-2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento (42a-42e) de puente.
- 10 8.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque** los elementos (2a-2f) superconductores están conectados según una configuración a modo de anillo.
- 9.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque** los elementos (2a-2f) superconductores están conectados según una secuencia lineal.
- 15 10.- Limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** la secuencia de elementos (2a-2f) superconductores comprende al menos tres elementos (2a-2f) superconductores.
- 11.- Método para fabricar un dispositivo (1; 21; 31; 41; 51; 61; 71; 72) superconductor de un limitador de corriente de falla de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10,
- caracterizado porque,**
- 20 cada elemento (2a-2f) superconductor se expone a una tensión aplicada transversalmente a través de la capa (4a-4c) eléctricamente aislante de modo que se inducen perforaciones de corriente a través de la capa (4a-4c) aislante, en el que la exposición a la tensión se realiza hasta que se queman los puentes de baja resistencia a través de la capa (4a-4c) de aislamiento.
- 25 12.- Método de acuerdo con la reivindicación 11, **caracterizado porque** la tensión se aplica a modo de rampa de tensión mediante una tensión que se incrementa gradualmente con el tiempo,
- en particular en el que la tensión se incrementa hasta su valor máximo durante un intervalo de tiempo de entre 0,3 segundos y 15 segundos.

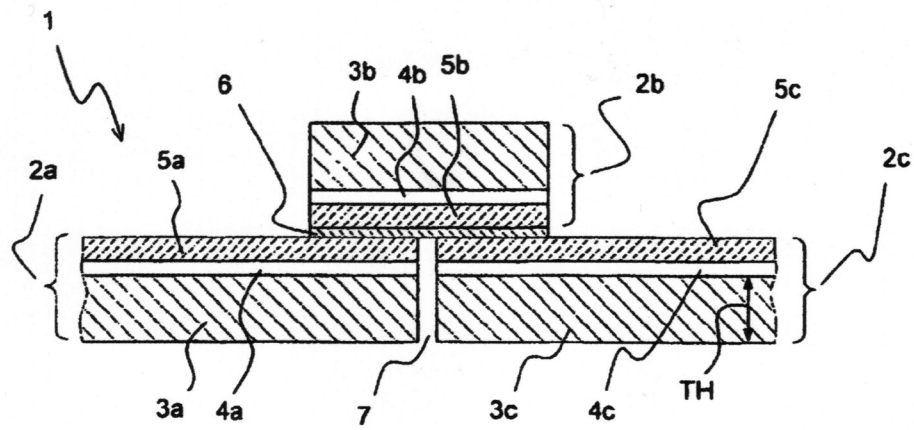


Fig. 1

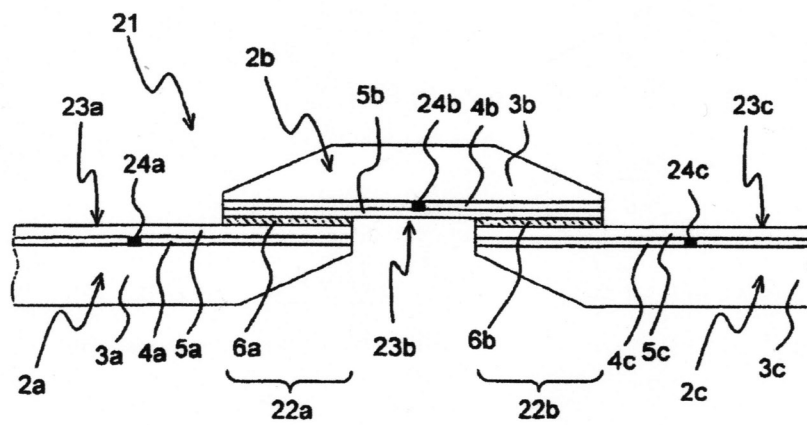


Fig. 2

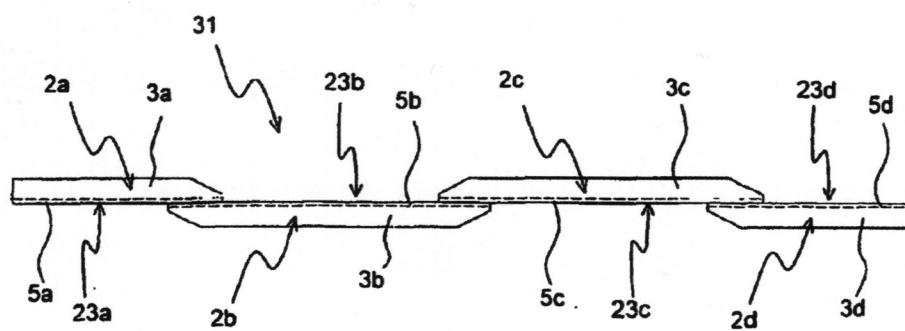


Fig. 3a

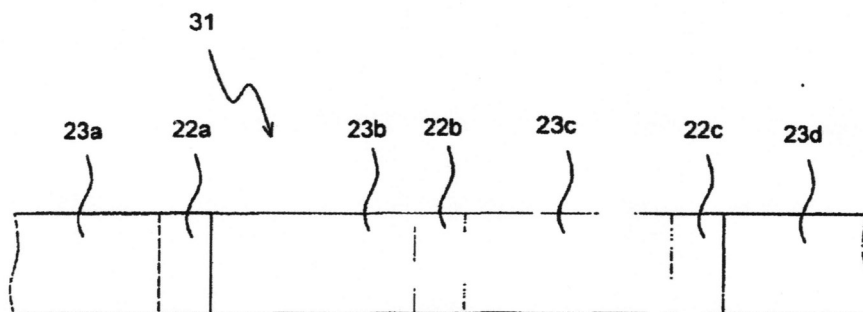


Fig. 3b

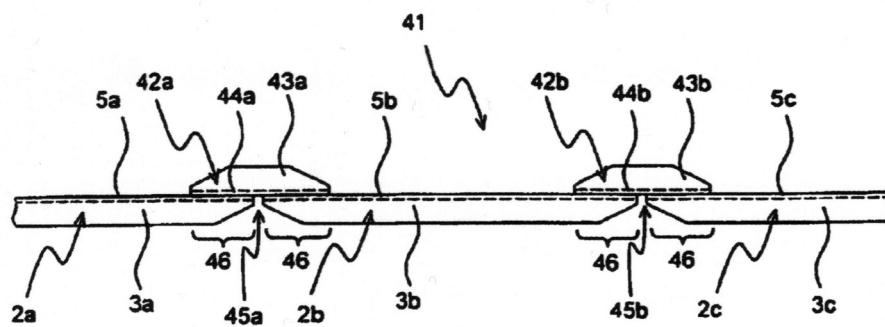


Fig. 4

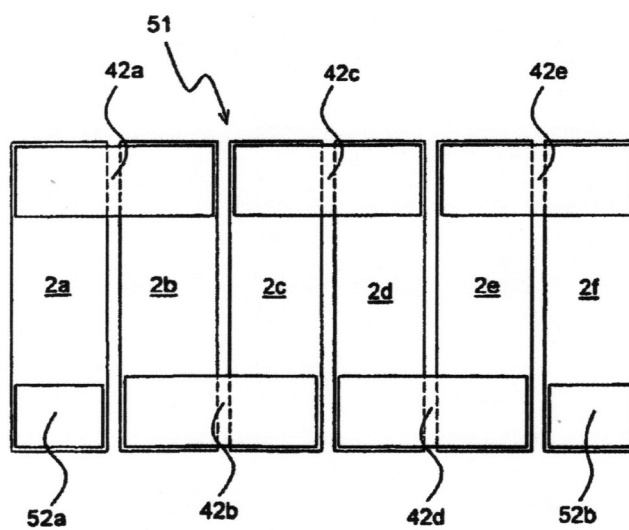


Fig. 5

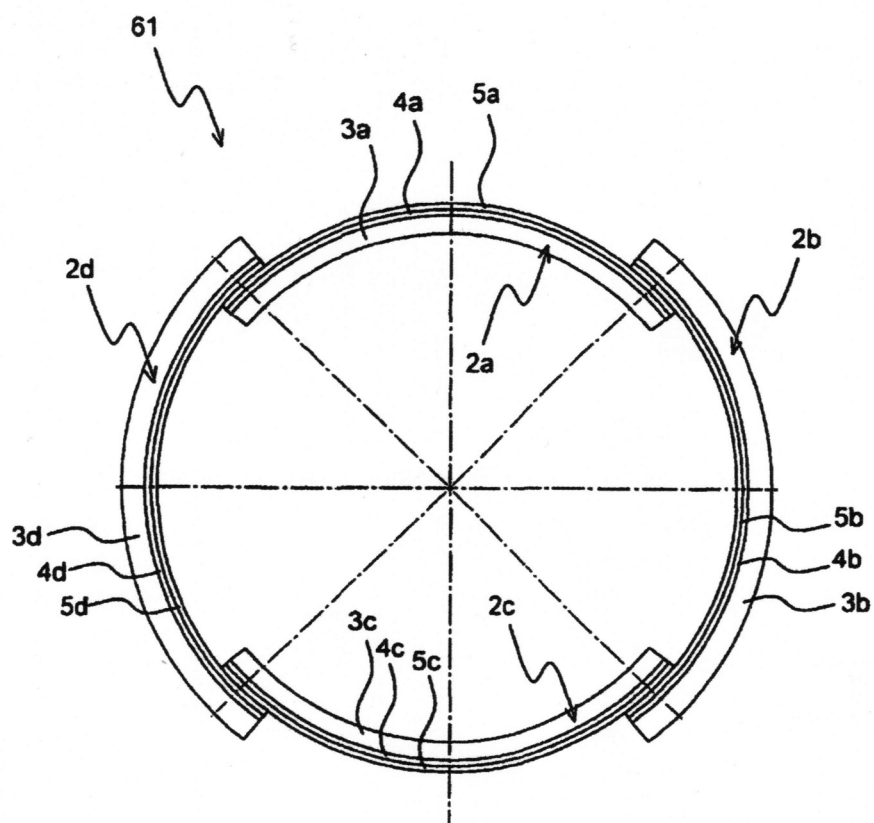


Fig. 6

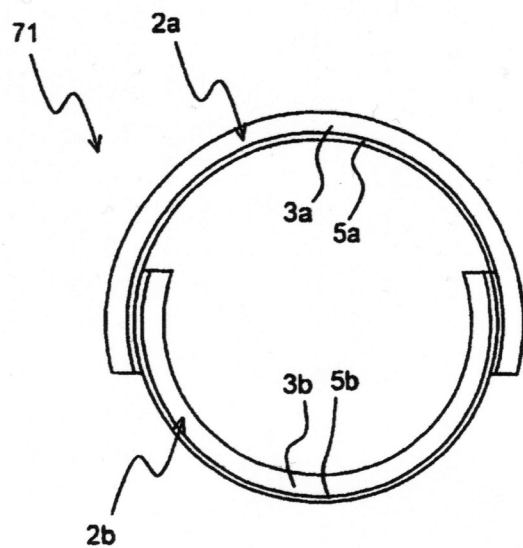


Fig. 7a

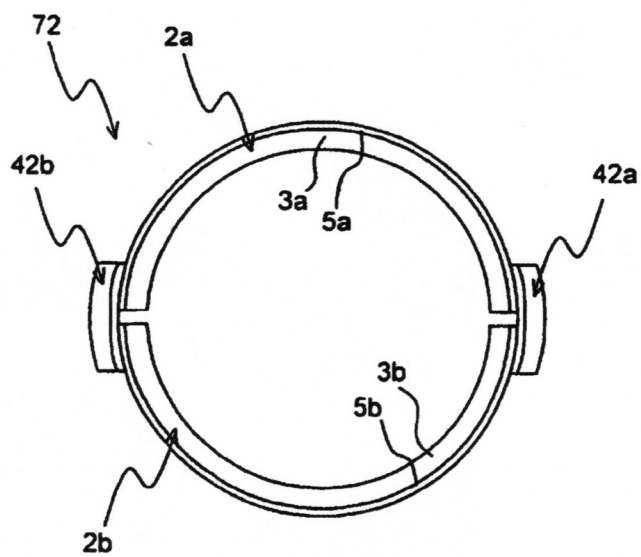


Fig. 7b