

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 385 313**

51 Int. Cl.:

H01L 39/16

(2006.01)

H01L 39/24

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08020789 .7**

96 Fecha de presentación: **29.11.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2192629**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.06.2010**

54 Título: **Limitador de corriente de falta con una pluralidad de elementos superconductores que tienen substratos electricamente conductores, aislados**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.07.2012

73 Titular/es:
**Alstom Technology Ltd.
Brown Boveri Str. 7
5400 Baden, CH y
Bruker HTS GmbH**

72 Inventor/es:
**Mumford, Francis James y
Usoskin, Alexander**

74 Agente/Representante:
Isern Jara, Nuria

ES 2 385 313 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 falta con una pluralidad de elementos superconductores que tienen substratos eléctricamente conductores, aislados.

5 La invención se refiere a un limitador de corriente de falta, con un dispositivo de superconducción que comprende una serie de elementos superconductores, cada uno de ellos con:

- 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 superconductores adyacentes de la serie están conectadas eléctricamente, en particular en serie,

en el que el sustrato eléctricamente conductor de cada elemento superconductor de la serie está aislado eléctricamente de cada sustrato eléctricamente conductor de estos elementos superconductores adyacentes dentro de la serie cuyas películas superconductoras están eléctricamente conectadas en serie con la película superconductora de dicho elemento superconductor,

15 en el que las películas superconductoras de al menos alguno de los elementos superconductores adyacentes están conectadas eléctricamente por medio de un elemento de puente,

en el que el elemento de puente comprende una sección de superconducción, y en el que las películas superconductoras de los elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento de puente están eléctricamente conectadas a la sección de superconducción,

20 y en el que el elemento de puente se solapa, en particular se solapa parcialmente, con ambos elementos superconductores adyacentes eléctricamente conectados por medio del elemento de puente.

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

25 Los limitadores de corriente de falta superconductores se utilizan para limitar el flujo de corriente a través del lado de carga de una circuitería eléctrica en caso de un cortocircuito en el lado de carga. En el caso más simple, el limitador de corriente de falta comprende un dispositivo de superconducción conectado en serie con la carga. El dispositivo de superconducción puede transportar una corriente con pérdidas muy bajas. Siempre que la corriente a través del dispositivo de superconducción no rebase la corriente crítica, el dispositivo de superconducción es prácticamente invisible dentro de la circuitería eléctrica, y son las características de la carga, en particular la resistencia, lo que determina la corriente dentro de la circuitería eléctrica.

30 En caso de que caiga la resistencia de la carga (es decir, exista un cortocircuito dentro de la carga), la corriente en el circuito se incrementa, y eventualmente sobrepasa la corriente crítica. En ese caso, el dispositivo de superconducción se extingue (es decir, se vuelve normalmente conductor), lo que da como resultado una elevada resistencia óhmica del dispositivo de superconducción. Como resultado, la corriente de la circuitería eléctrica cae correspondientemente, y la carga queda protegida frente a una corriente eléctrica elevada.

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

40 Un limitador de corriente de falta con un dispositivo de superconducción que utilice un material HTS es conocido a partir del documento US 5.986.536. Éste comprende varios elementos superconductores, cada uno de los cuales comprende una película HTS depositada sobre un sustrato eléctricamente aislante (dieléctrico), fabricado en particular con un material que permite el crecimiento texturizado de la película HTS tal como ZrO₂ estabilizado con ytrio, con una entrecapa delgada de Ag. Los elementos superconductores, es decir sus películas HTS, están

45 conectados en serie.

Los limitadores de corriente de falta de este tipo que comprenden elementos superconductores con películas superconductoras texturizadas depositadas sobre un sustrato dieléctrico, son bastante caras de fabricar. Además, tales limitadores de corriente de falta tienen un tiempo de recuperación relativamente largo después de un evento de extinción.

50 El documento DE 2410148 A divulga un dispositivo de conmutación que comprende una pluralidad de placas de aluminio perforadas de una manera tipo meandro, estando las placas recubiertas con capas superconductoras y teniendo capas de óxido de aluminio entre las mismas. Las capas superconductoras de placas contiguas están

conectadas en serie por medio de contactos sobresalientes.

El documento US 7.071.148 B1 describe un artículo superconductor asociado, en el que dos segmentos contiguos y orientados de manera similar, cada uno de los cuales comprende un sustrato a base de metal, una capa intermedia y un recubrimiento superconductor, están conectados eléctricamente a través de un tercer segmento opuesto del mismo tipo, dispuesto sobre la parte superior de los dos segmentos.

Objeto de la invención

El objeto de la invención consiste en introducir un limitador de corriente de falta que sea simple y altamente fiable, que sea barato de fabricar, y que sea capaz de recuperarse en un tiempo corto tras un evento de extinción.

Breve descripción de la invención

Este objeto ha sido logrado, de acuerdo con la presente invención, mediante un limitador de corriente de falta según la introducción realizada al principio, caracterizado porque el elemento de puente comprende un sustrato dieléctrico, y la sección de superconducción es una capa superconductora que cubre el sustrato dieléctrico,

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

De acuerdo con la invención, el limitador de corriente de falta (=FCL) es básicamente un dispositivo de superconducción que comprende una pluralidad de elementos superconductores; estos elementos superconductores tienen, cada uno de ellos, una película superconductora, en particular una película HTS, depositada sobre un sustrato eléctricamente conductor, en particular un sustrato metálico. La película superconductora y el sustrato eléctricamente conductor están (al menos en gran medida) aislados uno del otro; a este efecto, existe una capa intermedia de aislamiento depositada entre el sustrato eléctricamente conductor y la película superconductora. Se debe apreciar que se conocen hilos superconductores basados en sustratos eléctricamente conductores con un material HTS depositado sobre la parte superior de los mismos, por ejemplo a partir del documento US 6.765.151.

Un elemento superconductor basado en un sustrato eléctricamente conductor es mucho más barato de fabricar que un elemento superconductor basado en un sustrato dieléctrico, debido en particular a que los costes de los sustratos son diferentes en un factor del orden de aproximadamente 50. Además, un sustrato eléctricamente conductor, típicamente un sustrato de metal, ofrece también una conducción del calor mucho mejor que los típicos sustratos dieléctricos. Como consecuencia, después de un evento de extinción que caliente típicamente el elemento superconductor por encima de la temperatura crítica del material de la película superconductora, puede ser enfriado de manera mucho más rápida de manera que el limitador de corriente de falta recupere su operación normal mucho más rápidamente.

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

Cuando el FCL de la invención está en modo de falta, 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 falta, o más exactamente a través de las películas superconductoras ahora resistivas (conducción normal) dentro del limitador de corriente de falta. Sin embargo, existe una trayectoria de corriente de derivación, ofrecida por los sustratos eléctricamente conductores de los elementos superconductores cercanos. Si la tensión es suficientemente alta, esto puede provocar una ruptura de tensión desde una película superconductora a través de una capa intermedia de aislamiento hasta un sustrato eléctricamente conductor.

Si una trayectoria de corriente de derivación a través de los sustratos se vuelve activa, la resistencia de falta del limitador de corriente de falta podría caer significativamente, y la corriente de falta a través del FCL podría incrementarse, dañando la carga que debe ser protegida. Además, el calentamiento óhmico del FCL en caso de falta podría incrementarse, prolongando de ese modo el tiempo requerido para enfriar de nuevo el FCL por debajo de la temperatura crítica de sus películas superconductoras. La disipación de calor en sí misma puede dañar también el material superconductor en el FCL, limitando de ese modo la caída máxima de tensión a través de la dirección de transporte de corriente.

Mediante la presente invención, los sustratos eléctricamente conductores de elementos superconductores 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 longitud global de las películas superconductoras conectadas en serie en el FCL. Así, mediante la separación según la invención de sustratos eléctricamente conductores, se puede ajustar la caída de tensión a

través de la longitud de un sustrato eléctricamente conductor, y en particular reducirla a un valor que excluya de forma segura una ruptura de tensión a través de la capa de aislamiento. De acuerdo con la invención, en ninguna parte del dispositivo superconductor existe una diferencia de potencial de la tensión externa total a través de la capa de aislamiento, sino solamente de una fracción de la tensión externa total que no es suficientemente alta como para provocar una ruptura; entonces se mantiene inactiva la trayectoria de corriente de derivación a través del sustrato eléctricamente conductor.

De ese modo en el FCL de la invención, mientras esté en modo de falta, la resistencia del superconductor puede mantenerse alta y en consecuencia, el calentamiento por efecto Joule mantenerse bajo. Esto último reduce el tiempo de recuperación del FCL después de un evento de extinción, y permite una caída de tensión más elevada a través de las películas superconductoras sin riesgo de dañar el material superconductor.

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

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 eficaz de elementos superconductores desde el lado superior y a través del lado del sustrato.

Las películas superconductoras o los elementos superconductores adyacentes, conectados eléctricamente, están típicamente conectados a través de un medio de empalme, en el que las películas superconductoras tienen partes del área superficial que no están cubiertas con el medio de empalme ("parte de superficie libre"). La parte de superficie libre puede estar comprendida en la gama, en particular, del 10% al 98% de la superficie global de la película, y típicamente constituye la gran mayoría de la superficie global de la película.

De acuerdo con la invención, las películas superconductoras de al menos algunos elementos superconductores adyacentes están conectados eléctricamente por medio de un elemento de puente, en el que el elemento de puente comprende una sección de superconducción, y en el que las películas superconductoras de los elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio de un elemento de puente están ambos eléctricamente conectados a la sección de superconducción. El elemento de puente y su sección de superconducción permiten mayor libertad en cuanto a la interconexión de las películas superconductoras, en particular cuando los elementos superconductores adyacentes (contiguos) con películas superconductoras conectadas en serie están separados por una distancia significativa. La resistencia entre películas superconductoras conectadas durante el funcionamiento normal puede mantenerse así baja. Los elementos superconductores con películas superconductoras conectadas eléctricamente por medio de un elemento de puente son conocidos adicionalmente como elementos superconductores conectados por medio de un elemento de puente.

El elemento de puente, de acuerdo con la invención, comprende un sustrato dieléctrico, y la sección de superconducción es una capa superconductora que cubre el sustrato dieléctrico, en el que la capa superconductora del elemento de puente se enfrenta a las películas superconductoras de los elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento de puente, y en el que se solapa el elemento de puente, en particular se solapa parcialmente, con ambos elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento de puente. Las conexiones son simples y altamente fiables debido a una gran área de contacto, solamente con un mínimo de interfaces establecidas.

Se debe apreciar que un dispositivo de superconducción de un limitador de corriente de falta según la invención puede estar suplementado mediante elementos superconductores adicionales de otros tipos distintos de los descritos en lo que antecede; sin embargo, no se hará ninguna mención adicional a estos últimos.

El limitador de corriente de falta de la invención puede ser utilizado en una circuitería eléctrica que comprende una fuente de tensión, en particular una planta de potencia o una red de suministro de potencia, conectada en serie con una carga, en particular una subestación transformadora, y conectada en serie con el limitador de corriente de falta 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 falta de la invención, las películas superconductoras de algunos elementos superconductores adyacentes están conectadas eléctricamente de manera directa. Una conexión eléctrica directa es simple de realizar. La conexión eléctricamente directa significa en particular que no se incluye ninguna sección de superconducción intermedia. Los elementos superconductores con películas superconductoras conectadas eléctricamente de manera directa son conocidos además como elementos superconductores conectados eléctricamente de manera directa.

En un desarrollo más preferido de esta realización, los elementos adyacentes conectados eléctricamente de manera directa están:

- orientados con sus películas superconductoras enfrentándose entre sí, y
- desplazados uno contra otro de tal modo que los elementos superconductores adyacentes se solapan parcialmente en una región de solapamiento,

en el que, en la región de solapamiento, las películas superconductoras de los elementos superconductores solapantes están conectadas eléctricamente. Esta disposición es simple de realizar.

Otro desarrollo adicional preferido está caracterizado porque las películas superconductoras de los elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente están conectadas eléctricamente a través de una capa de un metal normalmente conductor. Interconectar las películas superconductoras de esta manera resulta simple y también altamente fiable debido al 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 superficie de la película superconductora ya recubierta con una capa protectora de metal muy delgada. Su labor consiste en proporcionar una baja resistencia interfacial con relación a la película superconductora así como asegurar una vinculación mecánica estable.

Estas sub-capas están fabricadas típicamente con metales preciosos o con una aleación de metales preciosos, que comprenden en particular oro y/o plata. Alternativamente, las sub-capas pueden ser a base de cobre o de aleaciones a base de cobre tales como Cu - Ag, Cu - Ag - In. Además, cada sub-capla puede comprender varias capas como por ejemplo una capa de "tierra" 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 de Au o de aleaciones metálicas. La misión de la capa final consiste en proporcionar pasivación de la superficie frente a reacciones químicas con el fin de mejorar la calidad de la soldadura, y así lograr una baja resistencia interfacial (por ejemplo, $<10^{-7}$ Ohmios $\times$ cm²) dentro 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, como 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 ya sea mediante soldadura fría (bajo presión) o ya sea por difusión térmica (por ejemplo, a 400 °C en caso de sub-capas de Ag).

En una realización ventajosa, los elementos superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio de un elemento de puente están:

- orientados con sus películas superconductoras enfrentadas en la misma dirección,
- y dispuestos próximos entre sí, con un espacio de separación entre dos elementos superconductores adyacentes,

en la que el elemento de puente establece una conexión eléctrica de las películas superconductoras de los elementos superconductores adyacentes a través del espacio de separación. El espacio de separación es una manera simple de aislamiento mutuo.

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

En otra realización preferida, los elementos superconductores están conectados según una secuencia lineal. Esta realización es particularmente adecuada para limitar corrientes de CC, en particular en las que una alta tensión externa se divide entre los elementos superconductores de la secuencia lineal.

Una realización apreciablemente preferida está caracterizada porque al menos uno de los elementos superconductores comprende un contacto eléctrico entre su película superconductora y su sustrato eléctricamente

conductor a través de su capa intermedia (aislante), en la que el contacto eléctrico está situado básicamente en mitad entre las regiones en las que el elemento superconductor está conectado eléctricamente a un elemento superconductor anterior y a uno siguiente. Con este medio, la caída de tensión a través de la capa intermedia aislante puede reducirse, en particular básicamente a la mitad. Debe apreciarse que el contacto eléctrico deberá extenderse, en la dirección del flujo de corriente, solamente a una pequeña distancia (en comparación con la longitud del elemento superconductor), con el fin de que no ofrezca una trayectoria de corriente de derivación sobre una longitud significativa que pudiera reducir la resistencia de falta.

Alternativamente, en otra realización, dentro de los elementos superconductores, la capa aislante es continua, aislando la película superconductora completamente del sustrato eléctricamente conductor. Esto es muy simple de fabricar.

En una realización particularmente preferida, el limitador de corriente de falta se caracteriza porque la secuencia de elementos superconductores comprende al menos tres elementos superconductores. En este caso, una tensión externa puede ser distribuida de manera más amplia. Esto es especialmente importante en el caso de FCLs de tipos resistivos. También dentro del marco de la presente invención se encuentra comprendido un método para producir un dispositivo superconductor para un limitador de corriente de falta, en particular un limitador de corriente de falta según la invención, como el que se ha descrito en lo que antecede,

en el que una secuencia de elementos superconductores, cada uno de ellos con:

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

se encuentran conectados eléctricamente, en particular conectados eléctricamente en serie, estableciendo una conexión eléctrica entre las películas superconductoras de elementos superconductores adyacentes, pero manteniendo el sustrato eléctricamente conductor de cada elemento superconductor de la secuencia aislado eléctricamente de los sustratos eléctricamente conductores de aquellos elementos superconductores adyacentes de la secuencia cuyas películas superconductoras están conectadas eléctricamente en serie con la película superconductora de dicho elemento superconductor, que se caracteriza porque cada elemento superconductor 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 (aislante), en la que 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. El dispositivo superconductor puede ser utilizado como, respectivamente dentro de, un limitador de corriente de falta, el cual es barato de fabricar, ofrece tiempos cortos de recuperación, y puede manejar altas tensiones externas. A título de procedimiento de quemado intencionado, el comportamiento aislante de la capa intermedia puede verse significativamente incrementado durante el último uso práctico mencionado. Obsérvese que la última etapa puede ser llevada a cabo antes o después de que los elementos superconductores hayan sido conectados eléctricamente.

En una variante preferida de este método, la tensión se aplica en forma de rampa de tensión con una tensión que se incrementa gradualmente con el tiempo, en particular en el que la tensión se incrementa hasta un valor máximo durante un intervalo de tiempo de entre 0,3 s y 15 s. De esta manera, los puentes de baja resistencia son quemados en secuencia, es decir, no de manera simultánea a modo de "explosión". Este proceso es mejor de controlar.

Con preferencia, la etapa de procesamiento en la que el elemento superconductor (respectivamente su capa intermedia) se expone 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 superconductor. De otro modo, el contacto eléctrico puede resultar dañado por la exposición a la tensión.

Se pueden deducir otras ventajas de la descripción y del dibujo adjunto. Las características mencionadas en lo que antecede y en lo que sigue, pueden ser utilizadas de acuerdo con la invención ya sea individualmente o ya sea en su conjunto según una combinación cualquiera. Las realizaciones mencionadas no deben ser entendidas como enumeración exhaustiva sino por el contrario con carácter de ejemplo para la descripción de la invención.

Dibujos

La invención se muestra en los dibujos.

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

La Figura 2 muestra una vista en sección transversal esquemática de un dispositivo superconductor de un limitador

de corriente de falta como información general, con conexión eléctrica directa de las películas superconductoras con capas de contacto locales en las interfaces;

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

La Figura 3b muestra una vista esquemática en planta del dispositivo superconductor de la Figura 3a;

La Figura 4 muestra una vista en sección transversal esquemática de un dispositivo superconductor de un limitador de corriente de falta según la invención, con conexión eléctrica de películas superconductoras por medio de elementos de puente;

La Figura 5 muestra una vista esquemática en planta de un dispositivo superconductor para un limitador de corriente de falta de la invención, con esquinas a 90° entre elementos superconductores y elementos de puente;

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

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

La Figura 7b muestra una vista en sección transversal esquemática de un dispositivo superconductor en forma de anillo de un limitador de corriente de falta de la invención, con dos elementos superconductores conectados a través de elementos de puente.

En las Figuras, se describen dispositivos superconductores para su uso en un limitador de corriente de falta, estando la invención ilustrada en las Figuras 4, 5 y 7b incluyendo los elementos de puente con sustratos dieléctricos.

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

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 ancho y 200 mm de largo. Más en general, la longitud de los elementos superconductores (medida en la dirección del flujo de 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 los elementos extinguidos (se consideraron caídas de tensión de 0,3 a 4 V/cm en este ejemplo), y del espesor y la calidad de la capa intermedia (aislamiento). La capa intermedia que comprende una capa de zirconio estabilizado con ytrio, tiene un espesor de 1 a 5 Qm en el ejemplo dado. El espesor de la película de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ es de 1,2 Qm. Los elementos superconductores produjeron una corriente crítica de 320 A a -196 °C.

La película 5a superconductora del elemento 2a superconductor de la izquierda está conectada eléctricamente a la película 5b superconductora del elemento 2b superconductor, el cual es el elemento superconductor siguiente de la conexión en serie de los elementos 2a - 2c superconductores del dispositivo 1 superconductor. La película 5b superconductora del elemento 2b superconductor, a su vez, está conectada eléctricamente a la película 5c superconductora del elemento 2c superconductor, el cual es de nuevo el elemento superconductor siguiente 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 de conexión central. La capa de conexión comprende típicamente una estructura multicapa que a su vez comprende sub-capas transitorias y una capa central.

Las sub-capas están formadas sobre la superficie de la película superconductora ya recubierta con una capa protectora muy delgada (0,07 Qm) 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 Qm de espesor, depositada mediante chapeado galvánico. Las sub-capas se proporcionan solamente dentro del área superficial dedicada a la conexión, es decir la superficie de apoyo de los elementos superconductores se mantiene libre de cualquier sub-fracción de capa de conexión.

La capa central ha sido proporcionada por medio de soldadura que comprende uno o más 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 Qm. La resistencia interfacial completa 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.

Los elementos 2a, 2c superconductores están alineados en paralelo, y el elemento 2b superconductor está orientado de forma opuesta a los mismos, 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 también los substratos 3a y 3c eléctricamente conductores están aislados eléctricamente uno del otro. En consecuencia, en este caso los substratos 3a, 3b, 3c eléctricamente conductores de todos los elementos 2a, 2b, 2c superconductores de la secuencia del dispositivo 1 superconductor están aislados eléctricamente cada uno de los otros, lo que se prefiere en general en la presente invención.

El espacio de separación 7 puede estar relleno de un aislador adicional (como por ejemplo, resina epoxi o teflón), con el fin de confinar la propagación de la soldadura metálica de la capa de conexión dentro del espacio de separación y de ese modo evitar la posibilidad de cortocircuitar los substratos 3a y 3c eléctricamente conductores.

Además, con el fin de conseguir un grado de aislamiento mejorado entre el sustrato y la película superconductora, cada elemento superconductor ha sido pre-tratado mediante exposición a una tensión aplicada transversalmente a través de la capa intermedia de modo que se inducen rupturas de corriente a través de la capa eléctricamente aislante, en la que la exposición a la tensión se lleva a cabo hasta que todos los puentes de baja resistencia a través de la capa de aislamiento se han quemado. Una tensión de CC que puede variar entre 10 y 200 V, se aplica entre la película superconductora y el sustrato eléctricamente conductor. La tensión es linealmente en rampa de una manera que la máxima tensión se alcanza dentro del período de 1 - 5 segundos; el valor máximo de tensión se determina con anterioridad al tratamiento como aproximadamente el 80% de la tensión de ruptura medida en una capa eléctrica aislante del mismo tipo pero con estructura homogénea, es decir, sin puentes de baja resistencia. Todos los procedimientos relacionados con tales tratamientos se realizan con preferencia en condiciones de temperatura ambiente. Con el enfriamiento de los elementos superconductores crece típicamente la tensión máxima de ruptura.

El dispositivo superconductor se enfría durante el funcionamiento, por ejemplo, con nitrógeno líquido (LN2), con preferencia desde ambos lados (inferior y superior), de modo que cada elemento superconductor 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 en las Figuras 2 a 7 siguientes, las características y los procedimientos correspondientes, en particular con respecto al tratamiento previo de la tensión, a los medios de enfriamiento y a los rellenos del espacio de separación del aislamiento, pueden ser aplicados 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 la capa de conexión, y las películas 5b, 5c superconductoras están conectadas por medio de una parte 6b de la capa de conexión. Las partes 6a, 6b de capa de conexión están separadas y por lo tanto eléctricamente aisladas 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 en 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 empalme (en este caso libres de pares de capa de conexión eléctricamente conductora) ayudan a incrementar la resistencia del dispositivo 21 superconductor bajo la corriente de falta. Esto resulta del hecho de que la extinción se forma preferentemente en las porciones de los elementos superconductores que no están "derivadas" por otro elemento superconductor o elemento de puente.

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

Se aprecia que en 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 puede ser suficientemente pequeño de modo que no se pueda establecer ninguna derivación significativa 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 superconductores conectados eléctricamente en serie, en sección transversal (Figura 3a) y en vista superior (Figura 3b). Los elementos 2a - 2d superconductores tienen una orientación alternativa, con elementos superconductores adyacentes con sus películas 5a - 5d superconductoras enfrentadas entre sí (obsérvese que las capas de aislamiento no han sido representadas en este caso, por motivos de simplicidad). En la vista superior de la Figura 3b, se pueden reconocer las regiones 22a, 22b, 22c de solapamiento. Las mismas ocupan alrededor del 20% de la totalidad de la superficie de las películas superconductoras, perteneciendo el otro 80% a las partes 23a - 23d de superficie libres.

La **Figura 4** muestra un diseño alternativo para un dispositivo 41 superconductor, que en este caso muestra una secuencia de tres elementos 2a, 2b, 2c superconductores con películas 5a, 5b, 5c superconductoras cada uno de

ellos (de nuevo, las capas de aislamiento intermedias no han sido representadas por motivos de simplicidad). Los elementos 2a - 2c superconductores están orientados todos ellos de forma idéntica con sus películas superconductoras enfrentándose al mismo lado (en este caso, el lado superior), y están separados por espacios de separación 45a, 45b.

- 5 Las películas 5a - 5c superconductoras están conectadas eléctricamente por pares en serie mediante elementos 42a, 42b de puente, comprendiendo cada una de ellas 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, a través de regiones 46 de solapamiento. En este ejemplo particular, los sustratos 43a, 43b dieléctricos están hechos ya sea de cerámica de zirconio estabilizado con ytrio o ya sea de zafiro (Al_2O_3 monocristalino).

- 15 La **Figura 5** muestra una vista superior de un dispositivo 51 superconductor, que va a ser utilizado en un limitador de corriente de falta de acuerdo con la invención. Existe una secuencia de seis elementos 2a - 2f superconductores rectos orientados en paralelo, todos ellos con sus películas superconductoras enfrenadas hacia arriba. Por medio de cinco elementos 42a - 42e de puente sujetos 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 resulte más compacto. Al principio y al final del dispositivo 51 superconductor (respectivamente, la secuencia de elementos 2a - 2f superconductores) existen dos pastillas 52a, 52b de metal, en particular pastillas de Cu, como empalmes externos, que han sido depositadas galvánicamente sobre los elementos 2a y 2f superconductores.

Las Figuras 1 a 5 han mostrado secuencias lineales de elementos superconductores. Las Figuras 6 a 7b muestran dispositivos superconductores configurados de forma rígida, en particular para su uso en limitadores de corriente de falta inductivos (basados en transformador).

- 25 La **Figura 6** muestra un dispositivo 61 superconductor con elementos 2a, 2b, 2c, 2d 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 posterior, estando la conexión eléctrica establecida solamente 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 aislados eléctricamente entre sí. Los elementos 2a - 2d superconductores están curvados en general a modo de arco circular.

- 30 La **Figura 7a**, muestra un dispositivo 71 superconductor para un limitador de corriente de falta similar al mostrado en la Figura 6, pero que comprende solamente elementos 2a, 2b superconductores con conexión eléctrica directa de sus películas 5a, 5b superconductoras. Obsérvese que las capas aislantes intermedias no han sido representadas por motivos de simplicidad.

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 de aislamiento intermedias no han sido representadas por motivos de simplicidad.

REIVINDICACIONES

1. - Limitador de corriente de falta, 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:

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

10 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 comprendidos dentro de la secuencia cuyas películas (5a - 5d) superconductoras están eléctricamente conectadas en serie con la película (5a - 5d) superconductora de dicho elemento (2a - 2f) superconductor,

15 en el que 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 de superconducción,

20 y en el que las películas (5a - 5d) superconductoras de los elementos (2a - 2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento (42a - 42e) de puente están ambos conectados eléctricamente a la sección de superconducción, y

 en el que el elemento (42a - 42e) de puente se solapa, en particular se solapa parcialmente, con ambos elementos (2a - 2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio del elemento (42a - 42e) de puente,

caracterizado porque

25 el elemento (42a - 42e) de puente comprende un sustrato dieléctrico (43a - 43b), y la sección de superconducción es una capa (44a, 44b) superconductora que cubre el sustrato (43a, 43b) dieléctrico,

 y **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 conectados eléctricamente por medio del elemento (42a - 42e) de puente.

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

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

- 35 - orientados con sus películas (5a - 5d) superconductoras enfrentándose entre sí, y
- desplazados cada uno hacia el otro, 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) superconductoras de los elementos (2a - 2f) superconductores solapantes están conectadas eléctricamente.

40 4. - Limitador de corriente de falta 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 conectados eléctricamente de forma directa están conectados eléctricamente a través de una capa (6; 6a, 6b) de un metal normalmente conductor.

45 5. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los elementos (2a - 2f) superconductores adyacentes conectados eléctricamente por medio de un elemento (42a - 42e) de puente están:

- orientados con sus películas (5a - 5d) superconductoras enfrentadas en la misma dirección,
- y dispuestos cada uno próximo al otro, 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).

5 6. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** los elementos (2a - 2f) superconductores están conectados según una configuración en forma de anillo.

7. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** los elementos (2a - 2f) superconductores están conectados según una secuencia lineal.

8. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7,

10 **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 en las que el elemento (2a - 2f) superconductor está conectado eléctricamente a un elemento (2a - 2f) superconductor precedente y a uno siguiente.

15 9. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque** dentro de los elementos (2a - 2f) superconductores, la capa (4a - 4c) de aislamiento es continua, aislando la película (5a - 5d) superconductora completamente del sustrato (3a - 3d) eléctricamente conductor.

20 10. - Limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la secuencia de elementos (2a - 2f) superconductores comprende al menos tres elementos (2a - 2f) superconductores.

11. - Método para producir un dispositivo (1; 21; 31; 41; 51; 61; 71; 72) superconductor para un limitador de corriente de falta, en particular un limitador de corriente de falta de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10,

en el que una secuencia de elementos (2a - 2f) superconductores, cada uno de ellos con:

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

30 están conectados eléctricamente, en particular conectados eléctricamente en serie, estableciendo una conexión eléctrica entre las películas (5a - 5d) superconductoras de elementos (2a - 2f) superconductores adyacentes, pero manteniendo el sustrato (3a - 3d) eléctricamente conductor de cada elemento (2a - 2f) superconductor de la secuencia aislado eléctricamente de los sustratos (3a - 3d) eléctricamente conductores de aquellos elementos (2a - 2f) superconductores adyacentes 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,

35 **caracterizado porque**

40 cada elemento (2a - 2f) superconductor está expuesto a una tensión aplicada transversalmente a través de la capa (4a - 4c) eléctricamente aislante de modo que se inducen rupturas de corriente a través de la capa (4a - 4c) aislante, en el que la exposición a la tensión se lleva a cabo hasta que todos los puentes de baja resistencia a través de la capa (4a - 4c) de aislamiento se han quemado.

12. - Método de acuerdo con la reivindicación 11, **caracterizado porque** la tensión se aplica a modo de rampa de tensión con un incremento de la tensión 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 s y 15 s.

45

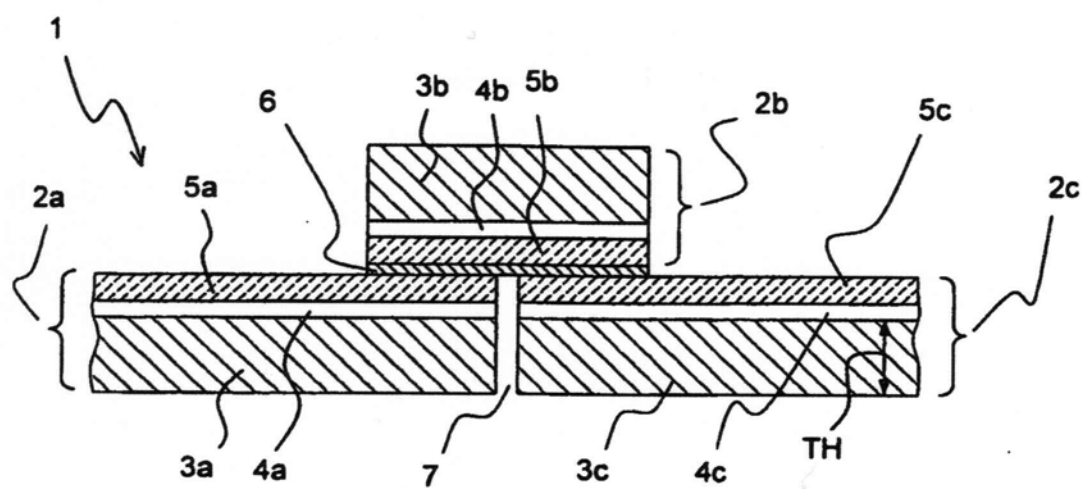


Fig. 1

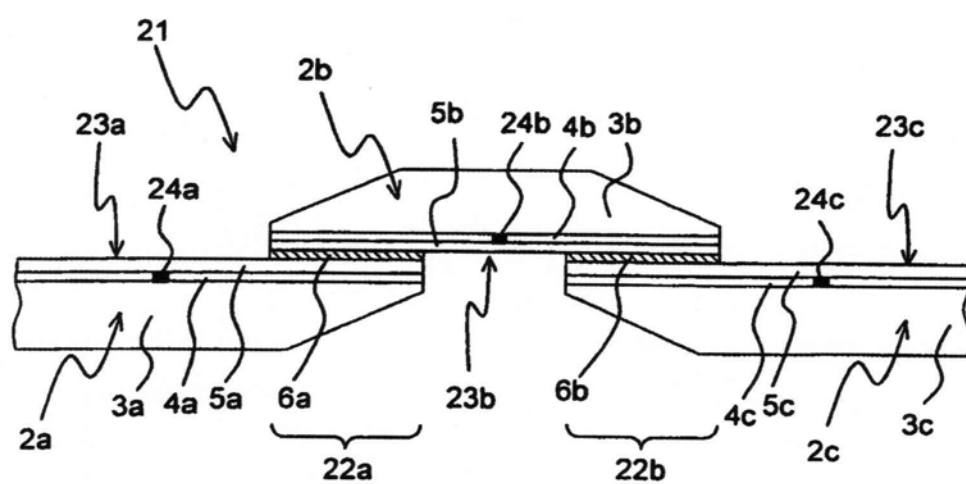


Fig. 2

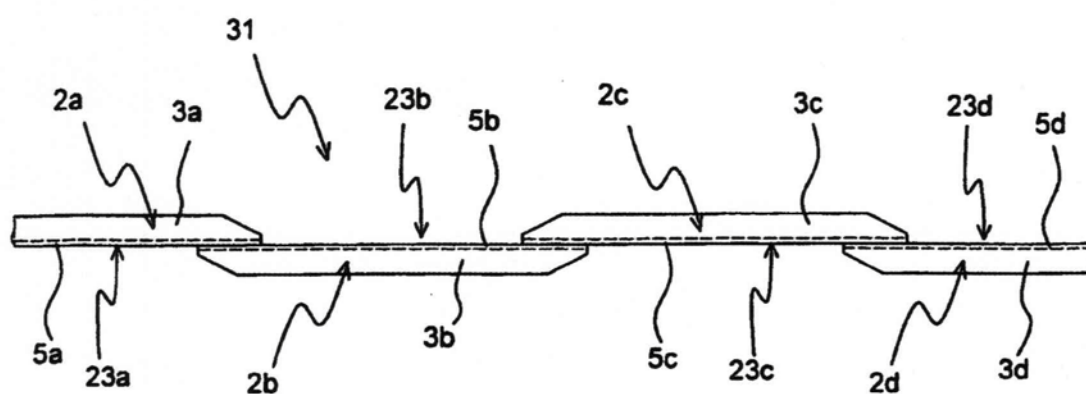


Fig. 3a

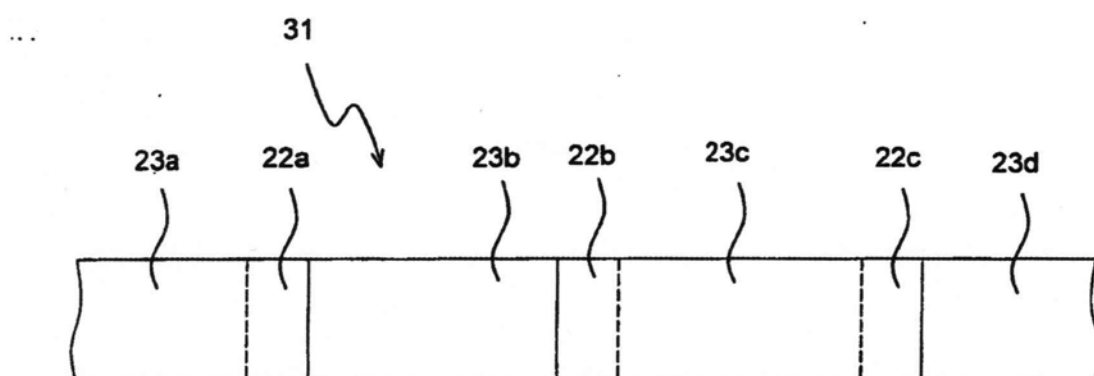


Fig. 3b

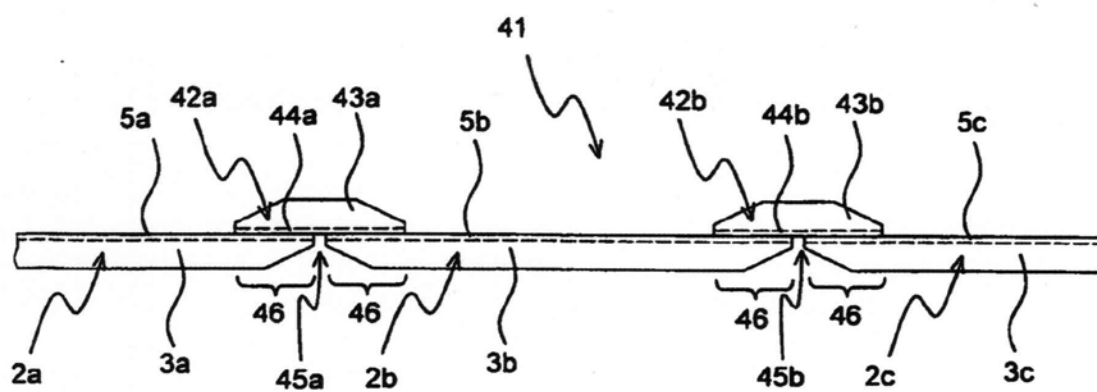


Fig. 4

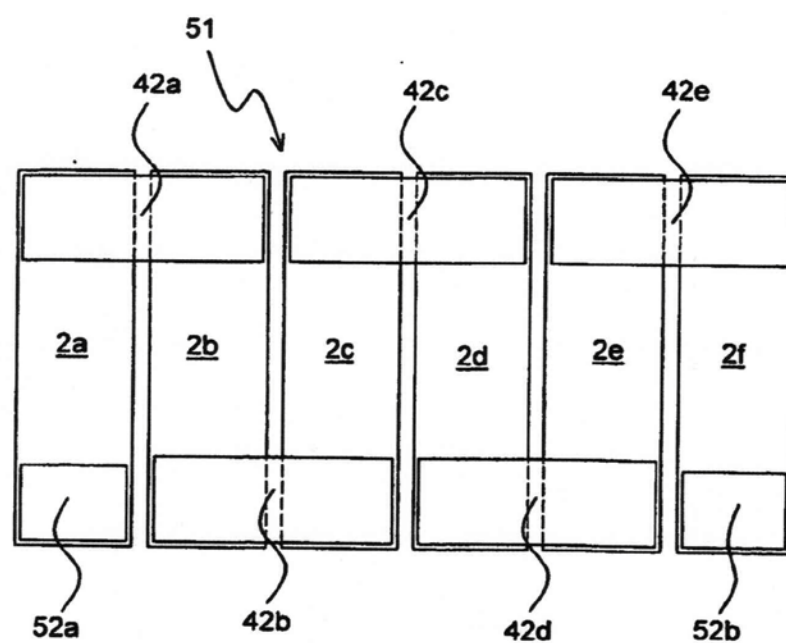


Fig. 5

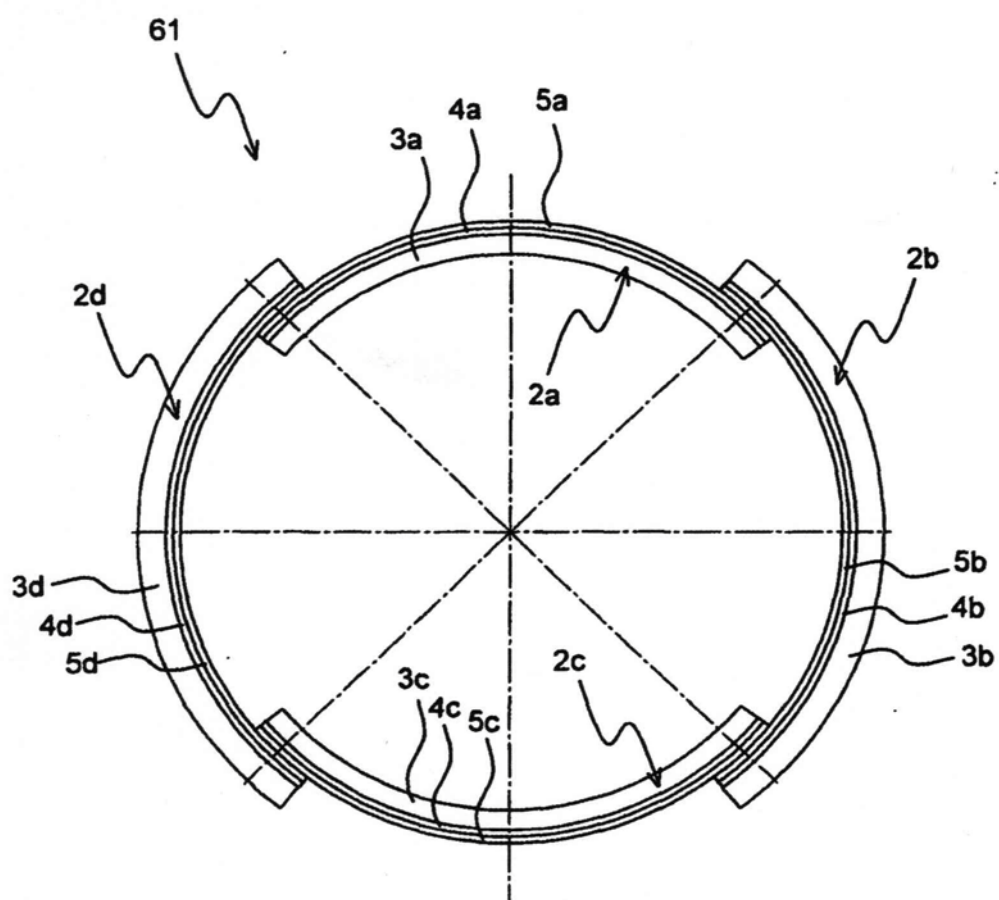


Fig. 6

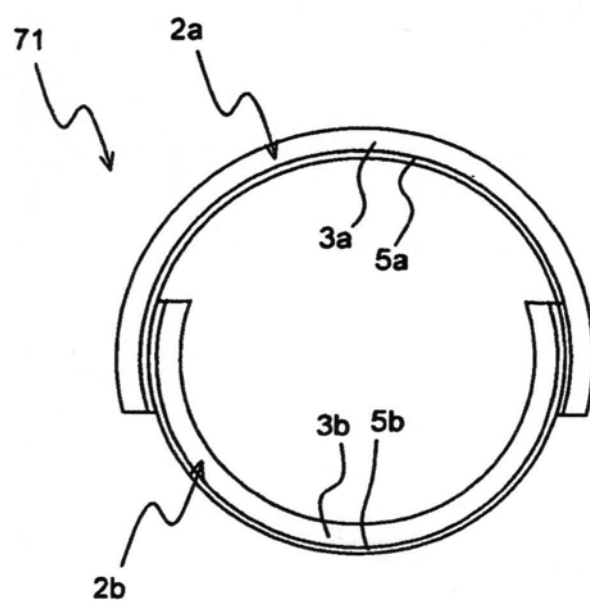


Fig. 7a

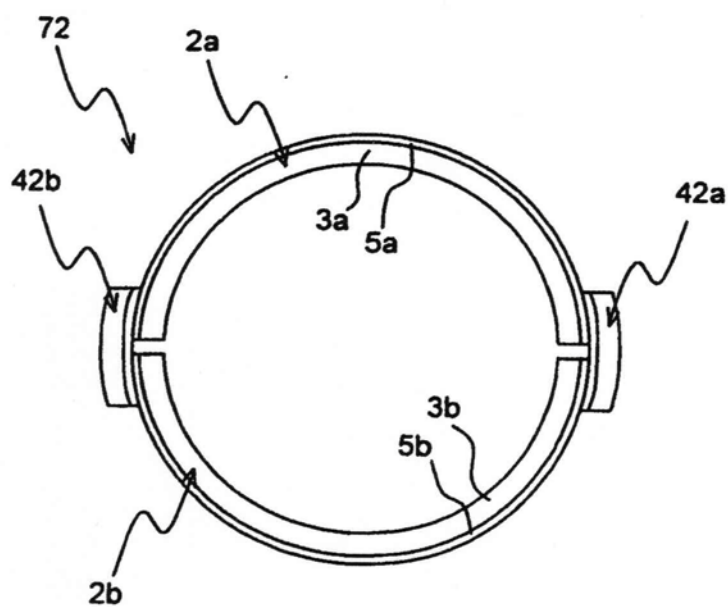


Fig. 7b