PCT WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation 6 :
H01L 39/16, H02H 9/02

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: **WO 96/10269**

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 4. April 1996 (04.04.96)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/CH95/00215

(22) Internationales Anmeldedatum: 25. September 1995 (25.09.95)

(30) Prioritätsdaten:
P 44 34 819.3 29. September 1994 (29.09.94) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten ausser US)*: ABB RESEARCH LTD. [CH/CH]; Affolternstrasse 52, CH-8050 Zürich 11 (CH).

(72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: BAUMANN, Thomas [DE/CH]; Schulstrasse 6, CH-5430 Wettingen (CH). PAUL, Willi [DE/CH]; Zentralstrasse 134, CH-5430 Wettingen (CH). RHYNER, Jakob [CH/CH]; Rotbuchstrasse 41, CH-8037 Zürich (CH).

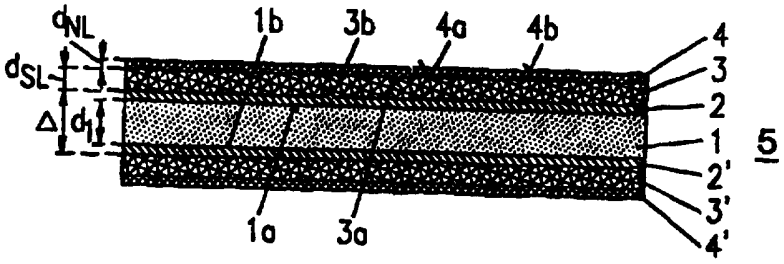
(74) Anwalt: ABB MANAGEMENT AG; Abt. TEI-Immaterialgüterrecht, CH-5401 Baden (CH).

(81) Bestimmungsstaaten: AU, BR, CA, CN, JP, NO, PL, RU, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

Veröffentlicht
Mit internationalem Recherchenbericht.

(54) Title: CURRENT-LIMITING DEVICE

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG ZUR STROMBEGRENZUNG



(57) Abstract

In order to limit overload currents in electric lines, caused by a short circuit for instance, the invention calls for a current limiter to be inserted in the electric line to limit the overload current to a given multiple of the nominal current. The simple, compactly designed current limiter has, disposed on each side of a disc-shaped insulator (1), a composite conductor made up of a high-temperature superconductor (3, 3') and a normal conductor (4, 4') connected flat against each other to give good electrical contact. Between the composite conductors and the insulator (1) is a chemically insulating buffer layer (2) made of 2-μm-thick silver. Either the superconductor side or the normal-conductor side of the composite conductor makes flat contact with the insulator (1). The electrical resistance of the shunt (4, 4') should not be greater than that of the superconductor (3, 3') connected to it. Each composite conductor is meander-shaped in design and electrically connected so that the current in adjacent strips of the composite conductor flows in opposite directions.

(57) Zusammenfassung

Zur Begrenzung von Überströmen in einer elektrischen Leitung, z.B. infolge eines Kurzschlusses, wird ein Strombegrenzer in die elektrische Leitung eingefügt, der den Überstrom auf ein vorgebbares Vielfaches eines Nennstromes begrenzt. Der einfach und kompakt aufgebaute Strombegrenzer weist beidseits eines scheibenförmigen Isolators (1) je einen Leiterverbund aus einem Hochtemperatursupraleiter (3, 3') und einem Normalleiter (4, 4') auf, die in gutleitendem flächenhaftem Kontakt miteinander verbunden sind. Zwischen diesen Leiterverbunden und dem Isolator (1) ist eine chemisch isolierende Pufferschicht (2) aus 2 µm dickem Silber angeordnet. Der Leiterverbund kann supraleiterseitig oder normalleiterseitig mit dem Isolator (1) flächenhaft kontaktiert sein. Der elektrische Widerstand eines Nebenschlußwiderstandes (4, 4') sollte nicht größer sein als der elektrische Widerstand des mit ihm verbundenen Supraleiters (3, 3'). Jeder Leiterverbund ist mäanderförmig ausgebildet und elektrisch so miteinander verbunden, daß ein Strom in direkt einander gegenüberliegenden Teilbändern der Leiterverbunde antiparallel fließt.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	**GA**	Gabon	**MR**	Mauretanien
AU	Australien	**GB**	Vereinigtes Königreich	**MW**	Malawi
BB	Barbados	**GE**	Georgien	**NE**	Niger
BE	Belgien	**GN**	Guinea	**NL**	Niederlande
BF	Burkina Faso	**GR**	Griechenland	**NO**	Norwegen
BG	Bulgarien	**HU**	Ungarn	**NZ**	Neuseeland
BJ	Benin	**IE**	Irland	**PL**	Polen
BR	Brasilien	**IT**	Italien	**PT**	Portugal
BY	Belarus	**JP**	Japan	**RO**	Rumänien
CA	Kanada	**KE**	Kenya	**RU**	Russische Föderation
CF	Zentrale Afrikanische Republik	**KG**	Kirgisistan	**SD**	Sudan
CG	Kongo	**KP**	Demokratische Volksrepublik Korea	**SE**	Schweden
CH	Schweiz	**KR**	Republik Korea	**SI**	Slowenien
CI	Côte d'Ivoire	**KZ**	Kasachstan	**SK**	Slowakei
CM	Kamerun	**LI**	Liechtenstein	**SN**	Senegal
CN	China	**LK**	Sri Lanka	**TD**	Tschad
CS	Tschechoslowakei	**LU**	Luxemburg	**TG**	Togo
CZ	Tschechische Republik	**LV**	Lettland	**TJ**	Tadschikistan
DE	Deutschland	**MC**	Monaco	**TT**	Trinidad und Tobago
DK	Dänemark	**MD**	Republik Moldau	**UA**	Ukraine
ES	Spanien	**MG**	Madagaskar	**US**	Vereinigte Staaten von Amerika
FI	Finnland	**ML**	Mali	**UZ**	Usbekistan
FR	Frankreich	**MN**	Mongolei	**VN**	Vietnam

Vorrichtung zur Strombegrenzung

TECHNISCHES GEBIET

Bei der Erfindung wird ausgegangen von einer Vorrichtung zur Strombegrenzung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

STAND DER TECHNIK

Mit dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 nimmt die Erfindung auf einen Stand der Technik Bezug, wie er aus der US-A-4,961,066 bekannt ist. Dort sind zur schnellen Strombegrenzung bei Kurzschlüssen als Strombegrenzer ein stabförmiger, ein rohrförmiger und ein ebenflächiger Schichtaufbau, jeweils aus einem Träger-Isolator, einer flächenhaft darauf aufgebrachten dünnen supraleitenden Schicht sowie einer auf dieser flächenhaft aufgebrachten Widerstandsschicht eines Normalleiters, angegeben. Die letzten beiden Schichten können sich aufeinanderfolgend wiederholen. Dabei ist der Widerstand des nicht supraleitenden Widerstandes kleiner als derjenige des Supraleiters im normalleitenden Zustand. Nachteilig sind große Energieverluste bei Wechselstrombetrieb sowie relativ lange Leiter.

Zum einschlägigen Stand der Technik wird zusätzlich auf die EP-A1-0 406 636 verwiesen. Dort ist zur Begrenzung von Überströmen in einer elektrischen Leitung eines Wechselstromkreises, z. B. infolge eines Kurzschlusses, ein Strombegrenzer vorgesehen, bei dem eine Drosselspule in einem Parallelzweig zu einem Hochtemperatursupraleiter geschaltet ist. Der Supraleiter ist innerhalb der Drosselspule angeordnet und zusätzlich parallel zu einem nichtsupraleitenden Nebenschlußwiderstand geschaltet.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung, wie sie im Patentanspruch 1 definiert ist, löst die Aufgabe, eine Vorrichtung zur Strombegrenzung der eingangs genannten Art derart weiterzuentwickeln, daß sie zur resistiven Begrenzung sowohl von Gleich- als auch von Wechselströmen geeignet ist. Ein Überstrom im Falle eines Kurzschlusses soll auf ein vorgebbares Vielfaches des Nennstromes begrenzt werden.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen definiert.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, daß die Vorrichtung zur Strombegrenzung einfach und kompakt ist. Der supraleitende Teil des Strombegrenzers ist modular aufgebaut, d. h., der Supraleiter ist in Einheiten unterteilt, die im Bedarfsfall separat entfernt und ausgewechselt werden können.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung können die im Strombegrenzer verwendeten Leiterverbunde aus Supraleitern und Normalleitern induktionsarm angeordnet sein. Durch eine geeignete Leiteranordnung können bei Wechselstromanwendungen auftretende Wechselstromverluste stark reduziert werden.

Die Vorrichtung zur Strombegrenzung kann auch als aktives Schaltelement eingesetzt werden, indem sie in ein externes Magnetfeld gebracht wird. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, daß der kritische Strom in Magnetfeldern sehr stark reduziert wird. Durch Einschalten des externen Magnetfeldes kann daher der Strom im Supraleiter auf einen Bruchteil des Nennstromes gebracht werden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine modulare Anordnung von Strombegrenzern in einer Magnetfeldspule im Querschnitt,

Fig. 2 einen Strombegrenzer gemäß Fig. 1 im Querschnitt,

Fig. 3 einen Supraleiter des Strombegrenzers gemäß Fig. 2 mit mäanderfömiger Leiterbahn in einem Querschnitt,

Fig. 4 Signaldiagramme von Wechselstromverlusten mit Strombegrenzern und

Fig. 5 - 8 Strombegrenzer mit unterschiedlichen Schichtenfolgen.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

Fig. 1 zeigt in einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Kryostat (7) 4 zueinander parallel angeordnete Strombegrenzer bzw. Strombegrenzermodule (5), die elektrisch in Reihe geschaltet und an eine Stromleitung (6) angeschlossen sind. Im Betrieb fließt ein Strom (I) durch die Stromleitung (6), der im Falle eines Überstromes, z. B. infolge eines Kurzschlusses, durch die Strombegrenzermodule (5) auf das 3fache - 5fache eines vorgebbaren Nennstromes (I_N) begrenzt werden soll. Der Kryostat (7) ist innerhalb einer Magnetfeldspule (8) angeordnet.

Fig. 2 zeigt den Schichtaufbau eines Strombegrenzermoduls (5) gemäß Fig. 1. Auf einer 1. Hauptfläche (1a) sowie auf einer dieser gegenüberliegenden 2. Hauptfläche (1b) einer scheibenförmigen Keramikplatte bzw. eines Isolators (1) mit einer Dicke (d_1) ist jeweils eine dünne Pufferschicht (2) aus Silber aufgebracht, deren Dicke im Bereich von 1 µm - 5 µm liegt. Als Materialien für den Isolator (1) kommen

plattenförmig erhältliche Isolatoren in Frage, die über eine genügende thermische Stabilität verfügen und zwischen Zimmertemperatur und 77 K eine thermische Langzeitänderung besitzen, welche derjenigen des Supraleiters (3, 3′) vergleichbar ist. Vorzugsweise werden glasfaserverstärkte Gießharzplatten oder MgO-Keramikplatten verwendet. Ihre Aufbringung auf die Pufferschicht (2) erfolgt am einfachsten mittels eines handelsüblichen Klebstoffes. Dieser Schritt ist erforderlich für Supraleiterplatten (3, 3′), die in einer Silberform geschmolzen wurden, welche nach dem Schmelzen entfernt wird; er entfällt bei Verwendung von Schmelzsubstraten auf einer Nickelbasislegierung oder Keramik, die nach der Herstellung des Supraleiters (3, 3′) nicht entfernt werden müssen und als mechanische Stabilisierung für diesen dienen können.

Auf die beiden Pufferschichten (2) sind, in flächenhaftem Kontakt mit diesen, scheibenförmige Hochtemperatursupraleiter bzw. Supraleiter (3, 3′) mit rechteckigem Querschnitt und mäanderförmiger Gestalt gemäß Fig. 3 und einer jeweiligen Dicke (d_{SL}) aufgebracht. Dabei ist eine 1. Hauptfläche (3a) jedes Supraleiters (3, 3′) zu dessen elektrischen Stabilisierung in elektrisch gutleitendem Kontakt mit der jeweiligen Pufferschicht (2). Die beiden Supraleiter (3, 3′) haben einen gegenseitigen Schichtabstand bzw. Leiterabstand (Δ).

Eine 2. Hauptfläche (3b) des jeweiligen Supraleiters (3, 3′) steht, zu dessen elektrischen und thermischen Stabilisierung, in einem flächenhaften, gutleitenden elektrischen Kontakt mit einer 1. Hauptfläche (4a) jeweils eines nichtsupraleitenden Widerstandes bzw. Normalleiters (4, 4′) mit einer Dicke (d_{NL}). Eine der 1. Hauptfläche (4a) gegenüberliegende 2. Hauptfläche des Normalleiters (4, 4′) ist mit (4b) bezeichnet. Als Metalle für die Normalleiter (4, 4′) eignen sich besonders solche mit einem spezifischen Widerstand bei Zimmertemperatur von $> 10\ \mu\Omega$ cm, die bei - 200 °C noch duktil sind. In Betracht kommen vorzugsweise: Zinn, Zink, Wismut und deren Legierungen sowie nichtmagnetische Metalle auf Stahl- oder Nickelbasis. Die

Normalleiter (4, 4') können durch galvanische Verfahren, Flammenspritzen, Plasmaspritzen, Aufkleben mit einem leitenden Kleber, Auflöten oder Aufsintern eines kalt aufgespritzten Metallpulvers auf den Supraleiter (3, 3') aufgebracht werden. Die Dicke der Schicht des Normalleiters (4, 4') sollte so sein, daß der elektrische Widerstand dieser Schicht etwa gleich groß ist wie derjenige der Schicht des angrenzenden Supraleiters (3, 3') in nichtsupraleitendem Zustand, z. B. 50 µm bei einer Dicke (d_{SL}) des Supraleiters (3, 3') von 1 mm. Ein flächenbezogener spezifischer Kontaktwiderstand zwischen der 2. Hauptfläche (3b) der Supraleiter (3, 3') und der 1. Hauptfläche (4a) der Normalleiter (4, 4') sollte < 1 mΩ cm^2, vorzugsweise ≤ 10 µΩ cm^2 sein.

Fig. 3 zeigt einen Querschnitt durch den Supraleiter (3) gemäß Fig. 2 in einem senkrechten Schnitt bezüglich der Schichtendarstellung in Fig. 2. Durch Einschnitte bzw. Mäanderaussparungen (9) in eine rechteckig, vorzugsweise quadratisch begrenzte Platte wird ein bandförmiger Leiter hergestellt. Endseitig sind auf diesem Leiter, zu dessen elektrischen Kontaktierung, Silberkontakte (10, 11) aufgebracht. Benachbarte Mäanderaussparungen (9) haben einen senkrechten Abstand (b), entsprechend einer Mäanderstegbreite. Die Herstellung der Mäander geschieht am einfachsten durch wechselseitige Einschnitte durch Fräsen oder Sägen oder Laser- oder Wasserstrahlschneiden; sie kann vor dem Aufbringen des Normalleiters (4, 4') und auch vor dem Aufbringen der mechanischen Stabilisierung, d. h. des Isolators (1), erfolgen.

Die mäanderförmigen Supraleiter (3, 3') sind in den Strombegrenzermodulen (5) beidseits des Isolators (1) so angeordnet, daß in jeweils gegenüberliegenden Mäanderstegen der Strom (I) in entgegengesetzter Richtung fließt, so daß sich die zur Bandebene senkrechten Komponenten des Eigenfeldes gegenseitig kompensieren. Damit wird erreicht, daß die Strombegrenzermodule (5) niederinduktiv und verlustarm sind.

Fig. 4 zeigt in Wechselstrom-Verlustkurven (12) bzw. (13) für unterschiedliche Verhältniswerte von Mäanderstegbreite (b) zur Dicke (d_{SL}) des Supraleiters (3, 3') die Wechselstromverluste, die bei der o. g. Stromrückleitung auftreten. Dabei sind auf der Abszisse der Leiterabstand (Δ) in mm und auf der Ordinate das Verhältnis von elektrischer Wechselstromverlustleistung (P) zu einer Leiterlänge (l) des Supraleiters (3, 3') in mW/m aufgetragen. Man erkennt aus der Wechselstrom-Verlustkurve (12), daß für $b/d_{SL} = 2$ die Wechselstromverluste mit zunehmendem Leiterabstand (Δ) abnehmen, während sie bei $b/d_{SL} = 15$ mit zunehmendem Leiterabstand (Δ) zunehmen, vgl. die Wechselstrom-Verlustkurve (13). Die Stromrückführungsanordnung in einem Strombegrenzermodul (5) führt mit zunehmendem Leiterabstand (Δ) nur dann zu einer Reduktion der Verluste, wenn das Mäanderband des Supraleiters (3, 3') genügend flach ist, d. h., wenn das Verhältnis b/d_{SL} genügend groß ist, bis zu einem kritischen Wert von 3,5. Für Bänder mit $b < 3{,}5 \cdot d_{SL}$ erhöht die Stromrückführung die Wechselstromverlustleistung (P), anstatt sie zu reduzieren.

Die Fig. 5 - 8 zeigen in vereinfachter Darstellung unterschiedliche Schichtfolgen, die anstelle des Schichtaufbaus von Fig. 2 verwendet werden können. Dabei sind mit (NL) Normalleiter (4, 4', 14, 15) und mit (SL) Supraleiter (3, 3') bezeichnet.

Gemäß Fig. 5 kann ein Leiterverbund bzw. Schichtenverbund aus einem Normalleiter (4, 4') und einem Supraleiter (3, 3') derart flächenhaft mit dem Isolator (1) bzw. der jeweiligen Pufferschicht (2) verbunden sein, daß jeweils der Normalleiter (4, 4') isolatorseitig angeordnet ist.

Gemäß Fig. 6 kann ein Leiterverbund aus einem Normalleiter (4, 4') und einem Supraleiter (3, 3') derart flächenhaft mit dem Isolator (1) bzw. der jeweiligen Pufferschicht (2) verbunden sein, daß der Isolators (1) mit einer seiner Hauptflächen mit dem Supraleiter (3) in Flächenkontakt steht, entsprechend der

Anordnung von Fig. 2, und mit seiner anderen Hauptfläche mit einem Normalleiter (4'), entsprechend der Anordnung von Fig. 5. Zusätzlich kann ein weiterer Isolators (1') vorgesehen sein, der über eine Pufferschicht (2) mit dem Supraleiter (3') in flächenhafter Verbindung steht.

Fig. 7 zeigt einen Schichtaufbau gemäß Fig. 5, bei dem die Außenflächen der Supraleiter (3, 3') mit zusätzlichen Normalleitern (14) bzw. (15) in flächenhaftem, elektrisch gutleitendem Kontakt sind.

Fig. 8 zeigt ein Strombegrenzermodul (5), das auf einer Seite des Isolators (1) einen Schichtaufbau gemäß Fig. 7 und auf der anderen Seite einen Schichtaufbau gemäß Fig. 2 aufweist.

In den Strombegrenzermodulen (5) gemäß Fig. 1 sind die Supraleiter (3, 3') resistiv in einen elektrischen Stromkreis eingekoppelt. Unterhalb einer gewissen kritischen Stromstärke (j_c) ist der Supraleiter (3, 3') im supraleitenden Zustand und zeigt daher praktisch keinen elektrischen Widerstand. Wird die kritische Stromstärke z. B. auf Grund eines Kurzschlusses überschritten, so geht der Supraleiter (3, 3') in seinen normalleitenden Zustand über. Der dadurch entstehende Widerstand begrenzt den Strom auf einen gegenüber dem Kurzschlußstrom viel kleineren Wert.

Wichtig sind die Dimensionierung des Supraleiters (3, 3'), dessen elektrische, thermische und mechanische Stabilisierung, die beim Betrieb resultierenden Wechselstromverluste und die Verbindungen zwischen den Strombegrenzermodulen (5).

Die elektrische und thermische Stabilisierung wird durch mindestens einen Normalleiter (4, 4', 14, 15) als Parallelleiter erreicht, der lokal in gutem elektrischem und thermischem Kontakt zum Supraleiter (3, 3') sein muß. Dieser Beipaßwiderstand (4, 4', 14, 15) kann im Bedarfsfall lokal einen Teil des Stromes vom Supraleiter (3, 3') übernehmen und diesen dadurch vor zu starker Erhitzung und Zerstörung

schützen. Damit der Supraleiter (3, 3') wirkungsvoll entlastet werden kann, darf der Beipaßwiderstand (4, 4', 14, 15) nicht größer sein als der Normalwiderstand des Supraleiters (3, 3'). Folglich muß die Dicke (d_{NL}) des Beipaßwiderstandes (4, 4', 14, 15) $\geq d_{SL} \cdot \rho_{NL}/\rho_{SL}$ sein, wobei ρ_{NL} und ρ_{SL} die spezifischen Widerstände des Beipaßwiderstandes (4, 4', 14, 15) bzw. des Supraleiters (3, 3') bedeuten. Da der Beipaßwiderstand (4, 4', 14, 15) möglichst viel Wärme aufnehmen sollte, ist man an einer großen thermischen Masse und folglich an einem hohen spezifischen Widerstand ρ_{NL} interessiert.

Im Betriebszustand muß der Supraleiter (3, 3') den Nennstrom (I_N) tragen können, was eine untere Grenze für seine Querschnittsfläche F ergibt gemäß:

$$F \geq 1{,}414 \cdot I_N/j_C.$$

Im Begrenzungszustand soll der Strom (I) höchstens auf das n-fache des Nennstromes (I_N) anwachsen, wobei in der Praxis Werte zwischen 3 und 5 gefordert werden. Diese Forderung ergibt die minimale Leiterlänge (l) des Supraleiters (3, 3') gemäß:

$$l \geq b \cdot (d_{SL}/\ _{SL} + d_{NL}/\rho_{NL}) \cdot 1{,}414 \cdot U_N/(n \cdot I_N),$$

wobei U_N die Nennspannung einer nicht dargestellten Stromquelle und b die Streifenbreite eines Leiterverbundes aus Beipaßwiderstand (4, 4', 14, 15) und Supraleiter (3, 3') bedeuten.

Die Wechselstromverlustleistung (P) eines stromdurchflossenen Supraleiters (3, 3') hängt stark vom lokalen Magnetfeld (Eigenfeld und etwaige externe Felder) ab. Bei bandförmigen Supraleitern (3, 3'), wie sie gemäß Fig. 1 verwendet werden, wirken sich vor allem die zur Bandebene senkrecht stehenden Feldkomponenten bezüglich der Wechselstromverlustleistung (P) sehr ungünstig aus. Die Leitergeometrie muß deshalb so beschaffen sein, daß das Feld im Supraleiter (3, 3') hauptsächlich parallel zur Bandebene orientiert ist. In einem

einzelnen stromtragenden dünnen Band steht das Magnetfeld im Leiter großenteils senkrecht auf der Bandebene, wobei die Wechselstromverlustleistung (P) für die Anwendung nicht akzeptabel wäre. Eine effiziente Reduktion der senkrechten Feldkomponenten läßt sich mit einer Leitergeometrie erreichen, die aus Paaren von senkrecht zur Bandebene eng benachbarten Leitersegmenten mit antiparallelem Strom (I) besteht. Für jedes Paar solcher Leiter liegt das Magnetfeld im Leiter zum großen Teil parallel zur Bandebene, was eine wesentlich kleinere Wechselstromverlustleistung (P) zur Folge hat. Die Wechselstromverlustleistung (P) pro Leiterlänge (l) ist gegeben durch:

$$P/l = 4 \cdot j_c \cdot [-A(x_{ez}) \cdot F + \int A(x)\, df],$$

wobei A(x) das Vektorpotential beim Maximalstrom, x_{ez} das sog. elektrische Zentrum des supraleitenden Bandes, in welchem das elektrische Feld stets = 0 ist, und F die Querschnittsfläche des Bandes bedeuten. Das Integral erstreckt sich über den gesamten Leiterquerschnitt F. Aus der obigen Formel zeigt sich, daß das Stromrückführungskonzept wirksam wird, wenn der Leiterabstand (Δ) der Supraleiter (3, 3') senkrecht zur Bandebene wesentlich kleiner ist als die Mäanderstegbreite (b). Für $\Delta \gg b$ verhalten sich die Supraleiter (3, 3') wie 2 einzelne Leiter mit hoher Wechselstromverlustleistung (P). Für b = 2 mm und d_{SL} = 0,5 mm läßt sich mit Stromrückführung eine Reduktion der Wechselstromverlustleistung (P) um einen Faktor 2 erreichen. Realisieren läßt sich das Stromrückführungskonzept mit mäander- oder spiralförmig angeordneten Bändern, vgl. Fig. 3. Dabei wird der Leiterabstand (Δ) vorzugsweise < 10 mm gewählt.

Beispiel 1 mit Schichtaufbau gemäß Fig. 2:

Nennleistung P_N	20 kW,
Nennspannung U_N	200 V,
Nennstrom I_N	100 A,
Maximalstrom I_{max}	300 A,
krit. Stromdichte j_c	1 kA/cm^2,

Breite des Leiters b	1,4 cm,
Breite der Mäanderaussparungen (9)	1 mm,
Leiterlänge l pro Modul (5)	126 cm,
Gesamtleiterlänge	8,8 m,
Anzahl Module (5)	7,
Wechselstromverlustleistung P bei 77 K	0,62 W.

Ein modular aufgebauter Hochtemperatursupraleiter (3, 3′) auf der Basis Bi : Sr : Ca : Cu = 2 : 2 : 1 : 2 wurde in einer Dicke (d_{SL}) von 1 mm auf eine Keramikplatte (1) mit einer Fläche von 10 cm · 10,4 cm und einer Dicke (d_1) von 1 mm beidseitig aufgebracht. Zwischen der Keramikplatte (1) und dem Supraleiter (3, 3′) befand sich eine Silberschicht (2) mit einer Dicke von 2 µm. Das Silber wirkt gleichzeitig als elektrischer Stabilisator (Beipaßwiderstand) und als chemischer Isolator zwischen dem Supraleiter (3, 3′) und dem Keramiksubstrat (1). Auf der anderen Seite des Supraleiters (3, 3′) war eine Bleischicht (4, 4′) mit einer Dicke (d_{NL}) von 10 µm aufgebracht, die ebenfalls zur elektrischen Stabilisierung beiträgt.

Aus der supraleitenden Schicht wurden von beiden Seiten der Platte Mäanderaussparungen (9) gemäß Fig. 3 geschnitten. Die 2 Leiterbahnen (3, 3′) auf beiden Seiten der Keramikplatte (1) sind elektrisch so miteinander verbunden, daß der Strom (I) in direkt einander gegenüberliegenden Teilbändern antiparallel fließt. Dadurch wird der Stromrückführungseffekt für die Reduktion der Wechselstromverlustleistung (P) erzielt.

Beispiel 2: Schalterfunktion gemäß Fig. 1
Indem man die Strombegrenzermodule (5) gemäß Beispiel 1 mit einer Magnetfeldspule (8) umschließt, wie in Fig. 1 dargestellt, kann die erfindungsgemäße Vorrichtung als aktives Schaltelement eingesetzt werden. Beim Einschalten des Magnetfeldes wird die kritische Stromstärke (j_C) im Supraleiter (3, 3′) reduziert, so daß der Supraleiter (3, 3′) in den resistiven Zustand übergeht. Dies bewirkt eine Reduktion des Stromes (I) auf einen Bruchteil des Nennstromes (I_N). Auf Grund

der Texturierung des Supraleiters (3, 3') ist eine Reduktion der kritischen Stromstärke (j_c) dann am stärksten, wenn das angelegte Magnetfeld senkrecht zur Ebene des supraleitenden Bandes steht, wie in Fig. 1.

Herstellung einer supraleitenden Platte (1):
Supraleiterpulver der Zusammensetzung $Bi_a Sr_b Ca_c Cu_d O_e$ mit a, b, d = 1,8 - 2,2, c = 0,8 - 1,2, e = 7,5 - 8,5 wird in eine geeignete Flachform trocken oder als Suspension mit einer Flüssigkeit eingefüllt. In einer bevorzugten Ausführungsart wird diesem Supraleiterpulver Silberpulver und/oder Bi_2O_3-Pulver in einem Konzentrationbereich von 0,5 % - 5 % zugemischt, wodurch die Aufschmelzung und Kompaktierung der Schmelze positiv beeinflußt wird. Als Schmelzform ist jedes Material geeignet, welches während des darauffolgenden Aufschmelzens des Pulvers nicht mit dem Pulver reagiert und bei Temperaturen um 900 °C formstabil bleibt. Verwendet wurden Formen aus Silberblech, aus Nickellegierungen mit einer Schutzschicht aus Silber und Keramikplatten aus Magnesiumoxid und stabilisiertem Zirkonoxid. Die Metallformen konnten leicht, z. B. durch Tiefziehen oder Falten, mit einem Rand von ca. 10 mm Höhe versehen werden. Als Pufferschicht (2) bzw. Klebemittel wurde Leitsilber verwendet. Die Füllhöhe wurde so gewählt, daß bei 100 %iger Kompaktierung des Pulvers durch das Aufschmelzen eine Dicke (d_{SL}) von 0,3 mm - 3 mm resultiert. Vorteilhaft für die erzielbare Stromdichte und Homogenität ist eine möglichst hohe sog. Gründichte des Pulvers, welche durch uniaxiales Nachpressen des lockeren Pulverbettes erreicht wurde. Dabei ist ein Preßdruck von 10 MPa ausreichend. Das Schmelzverfahren ist in der DE-A1-4 234 311 beschrieben.

Aufbringen der elektrischen Stabilisierung:
Supraleiterplatten (1), welche in Silber- oder Keramikformen hergestellt wurden, hat man mit einer Metallisierung (4, 4', 14, 15) versehen, welche als elektrische Stabilisierung dient. Hierzu muß das Silber von der Supraleiterplatte (1) entfernt werden, was vor der Metallisierung oder nach einem Aufbringen einer mechanischen Stabilisierung geschehen kann.

Bei Verwendung von Schmelzformen aus versilberter Nickelbasislegierung kann auf eine separate elektrische Stabilisierung verzichtet werden, wenn der Widerstand der Kombination Silber - Nickelbasislegierung schon demjenigen des Supraleiters (3, 3′) entspricht.

Beispiel 3:
Aus einem 100 µm dicken Silberblech wurden quadratische Schmelzformen mit Abmessungen von 100 mm · 100 mm mit Rändern von 6 mm Höhe von Hand gefalzt. Diese Schmelzformen wurden jeweils mit einer Aufschlämmung von 60 g Pulver $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_{8+\delta}$ in Äthanol gefüllt, $0 \leq \delta \leq 0,3$. Nach dem Eintrocknen der Flüssigkeit wurde das Pulverbett durch uniaxiales Pressen mit einem Druck von 2 GPa verdichtet. Die Proben wurden dann einer Wärmebehandlung in Sauerstoffatmosphäre unterworfen, welche aus einem Aufschmelzschritt bei 900 °C während einer Dauer im Bereich von 20 h - 80 h bestand. Im Ergebnis wurden homogene, kompakte Supraleiterplatten (3, 3′) von ca. 1 mm Dicke erhalten, von welchen sich das Silber leicht abschälen ließ. Auf diese Supraleiterplatten (3, 3′) wurde mittels Flammenspritzen zur elektrischen Stabilisierung eine 50 µm dicke Zinnschicht abgeschieden. Diese Supraleiterplatten (3, 3′) wurden dann auf ein Aluminiumblech geklebt und mittels Wasserstrahlschneiden mäandriert, wodurch Leiter mit einem Querschnitt von 14 mm · 1 mm und einer Länge von ca. 70 cm entstanden. Nach einem Ablösen vom Aluminiumblech wurden jeweils 2 Supraleiterplatten (3, 3′) so gegeneinander ausgerichtet, daß deren Bahnen auf der Vorder- und Rückseite der Keramikplatte (1) parallel verlaufen und die Enden mit den Silberkontakten (10, 11) übereinander liegen. Die Silberkontakte (10, 11) sind mit einem silbergefüllten Epoxidharzkleber aufgeklebt; durch sie können die Enden niederohmig in Reihe geschaltet werden. Der spezifische Kontaktwiderstand der Verklebung mit silbergefülltem Epoxidharz beträgt 0,05 µΩ cm^2. Bei einem Strom (I) von 1 kA baute das Strombegrenzermodul (5) einen Widerstand von 5 Ω auf.

Zweckmäßig ist es, das Verhältnis von Leiterabstand (Δ) zu Mäanderstegbreite (b) eines Strombegrenzermoduls (5) < 0,5, vorzugsweise < 0,1 zu wählen.

BEZEICHNUNGSLISTE

1, 1'	Isolatoren, Keramikplatten
1a, 1b	1. bzw. 2. Hauptfläche von 1, 1'
2	Pufferschicht, Silberschicht
3, 3'	Supraleiter, Hochtemperatursupraleiter
3a, 3b	1. bzw. 2. Hauptfläche von 3, 3'
4, 4', 14, 15	nichtsupraleitende Widerstände, Nebenschlußwiderstände zu 3, 3'
4a, 4b	1. bzw. 2. Hauptfläche von 4, 4'
5	Strombegrenzermodul, Strombegrenzer
6	Stromleitung
7	Kryostat
8	Magnetfeldspule
9	Mäanderaussparungen
10, 11	Silberkontakte
12, 13	Wechselstrom-Verlustkurven
b	Mäanderstegbreite, Breite der Leiterbahn von 3, 3', Streifenbreite eines Leiterverbundes
d_{NL}	Dicke von 4, 4', 14, 15
d_{SL}	Dicke von 3, 3'
d_1	Dicke von 1
I	Strom
l	Leiterlänge
NL	Normalleiter
P	elektrische Wechselstromverlustleistung
SL	Supraleiter
Δ	Leiterabstand, Schichtabstand der SL

PATENTANSPRÜCHE

1. Vorrichtung zur Strombegrenzung
   a) mit mindestens einem Supraleiter (3, 3') und
   b) mit mindestens einem nichtsupraleitenden Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) parallel zum Supraleiter (3, 3'),
   c) wobei der Supraleiter (3, 3') über mindestens eine 1. Hauptfläche (3b) flächenhaften Kontakt mit einer Hauptfläche (4a) eines Nebenschlußwiderstandes (4, 4', 14, 15) hat und mit diesem einen Leiterverbund bildet und
   d) mindestens eine 1. Hauptfläche (1a) eines Isolators (1, 1') in flächenhaftem Kontakt mit diesem Leiterverbund steht,

   dadurch gekennzeichnet,
   e) daß auch eine 2. Hauptfläche (1b) des Isolators (1) mit einem Leiterverbund aus einem Supraleiter (3, 3') und einem Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) in flächenhaftem Kontakt steht.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
   a) daß ein flächenbezogener spezifischer Kontaktwiderstand zwischen Supraleiter (3, 3') und Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) < 1 $m\Omega$ cm^2 ist,
   b) insbesondere, daß der spezifische Kontaktwiderstand zwischen Supraleiter (3, 3') und Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) < 10 $\mu\Omega$ cm^2 ist.

3. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Hauptfläche (1a, 1b) eines Isolators (1, 1') über eine Hauptfläche (4b) eines Nebenschlußwiderstandes (4, 4', 14, 15) mit einem Leiterverbund aus einem Supraleiter (3, 3') und einem Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) in flächenhaftem Kontakt steht.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Supraleiter (3') über eine seiner beiden Hauptflächen mit einer Hauptfläche eines weiteren Isolators (1') in flächenhaftem Kontakt steht.

5. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Hauptfläche (1a, 1b) eines Isolators (1, 1') über eine elektrisch leitende und chemisch isolierende Pufferschicht (2) in flächenhaftem Kontakt mit diesem Leiterverbund steht.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Pufferschicht (2) eine Silberschicht mit einer Dicke im Bereich von 1 μm - 5 μm ist.

7. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
   a) daß jeder Leiterverbund bandförmig ausgebildet ist und
   b) daß auf beiden Hauptflächen (1a, 1b) des Isolators (1) angeordnete Leiterverbunde elektrisch so miteinander verbunden sind, daß ein Strom (I) in direkt einander gegenüberliegenden Bändern der Leiterverbunde antiparallel fließt.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet,
   a) daß jeder Leiterverbund mäanderförmig ausgebildet ist,
   b) daß eine Mäanderstegbreite $b > 3{,}5 \cdot d_{SL}$ ist,
   c) insbesondere, daß $b > 10 \cdot d_{SL}$ ist, d_{SL} = Dicke des Supraleiters (3, 3').

9. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
   a) daß das Verhältnis von einem Leiterabstand (Δ) 2er Supraleiter (3, 3') eines Strombegrenzermoduls (5) zu einer bzw. der Mäanderstegbreite (b) der Supraleiter (3, 3') < 0,5 ist,
   b) insbesondere, daß es < 0,1 ist.

10. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

a) daß der elektrische Widerstand eines Nebenschlußwiderstandes (4, 4', 14, 15) nicht größer ist als der elektrische Widerstand des mit ihm verbundenen Supraleiters (3, 3') in seinem nichtsupraleitenden Zustand und

b) daß für eine minimale Leiterlänge l des Supraleiters (3, 3') gilt:
$l \geq b \cdot (d_{SL}/\rho_{SL} + d_{NL}/\rho_{NL}) \cdot 1{,}414 \cdot U_N/(n \cdot I_N)$,
wobei d_{SL} die Dicke des Supraleiters (3, 3'), d_{NL} die Dicke des Nebenschlußwiderstandes (4, 4', 14, 15), ρ_{SL} und ρ_{NL} die spezifischen Widerstände des Supraleiters (3, 3') bzw. des Nebenschlußwiderstandes (4, 4', 14, 15), I_N den Nennstrom, n das Verhältnis von zulässigem Maximalstrom zu I_N, U_N die Nennspannung einer Stromquelle und b die Streifenbreite eines Leiterverbundes aus Beipaßwiderstand (4, 4', 14, 15) und Supraleiter (3, 3') bedeuten.

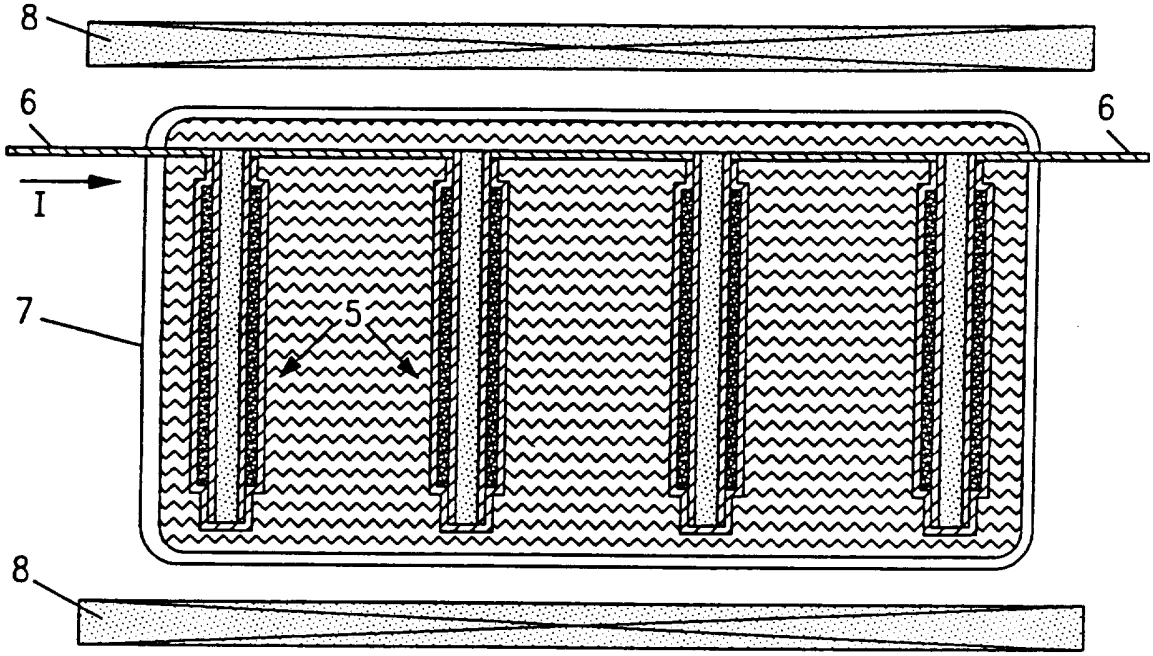


FIG.1

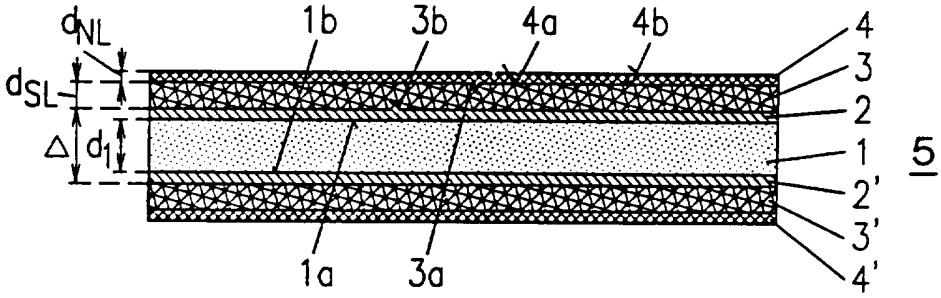


FIG.2

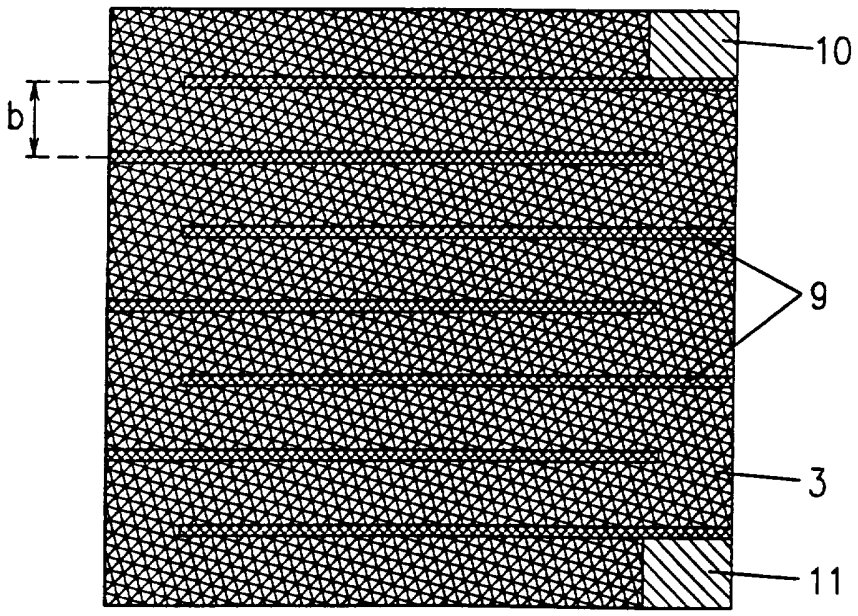


FIG.3

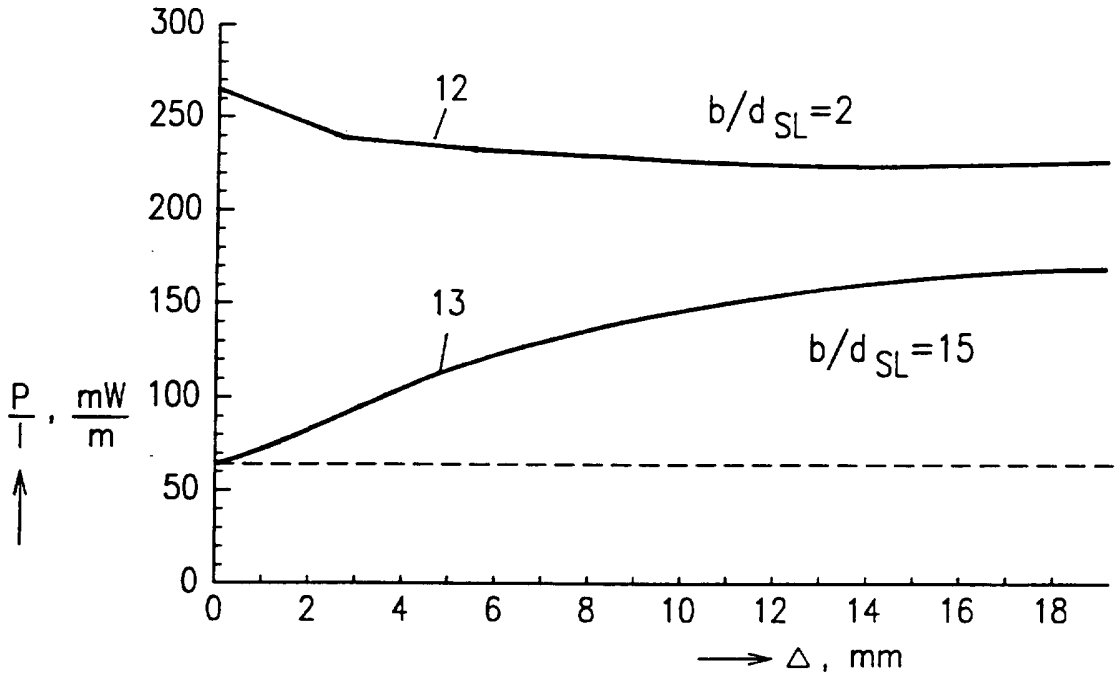


FIG.4

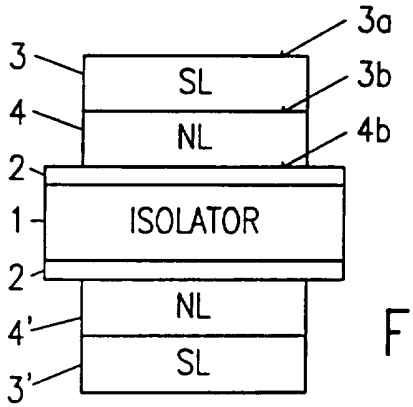


FIG.5

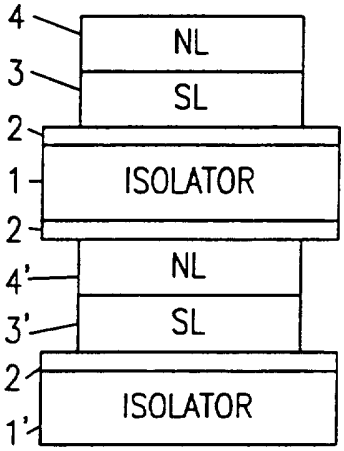


FIG.6

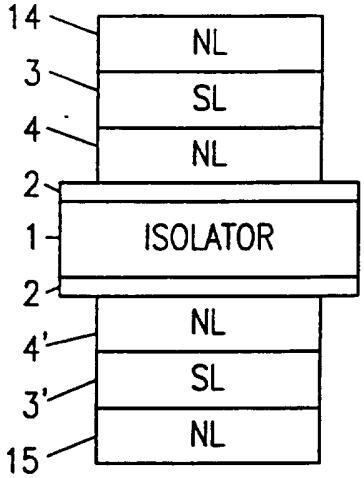


FIG.7

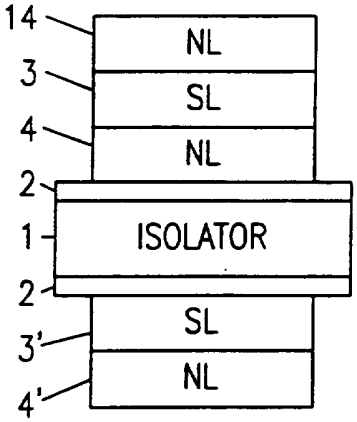


FIG.8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter. nal Application No
PCT/CH 95/00215

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 6 H01L39/16 H02H9/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 6 H01L H02H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 015 no. 054 (E-1031) ,8 February 1991 & JP,A,02 281765 (FURUKAWA ELECTRIC CO LTD:THE) 19 November 1990, see abstract	1
A	EP,A,0 315 976 (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO) 17 May 1989 see figure 5	1
A	EP,A,0 345 767 (ASEA BROWN BOVERI) 13 December 1989 cited in the application see abstract	1

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

1

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
5 December 1995	20.12.95

Name and mailing address of the ISA	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+ 31-70) 340-3016	Pelsers, L

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Inter... al Application No
PCT/CH 95/00215

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
EP-A-0315976	17-05-89	JP-A-	1190218	31-07-89
		JP-A-	1214223	28-08-89
		JP-A-	1283019	14-11-89
		JP-A-	1283020	14-11-89
		JP-A-	1126133	18-05-89
		JP-A-	1160322	23-06-89
		DE-D-	3887090	24-02-94
		DE-T-	3887090	19-05-94
		US-A-	4994932	19-02-91
EP-A-0345767	13-12-89	SE-B-	461306	29-01-90
		CA-A-	1331206	02-08-94
		DE-D-	68912409	03-03-94
		DE-T-	68912409	25-08-94
		JP-A-	2041619	09-02-90
		SE-A-	8802172	11-12-89
		US-A-	4961066	02-10-90

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/CH 95/00215

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 6 H01L39/16 H02H9/02

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 6 H01L H02H

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 015 no. 054 (E-1031) ,8.Februar 1991 & JP,A,02 281765 (FURUKAWA ELECTRIC CO LTD:THE) 19.November 1990, siehe Zusammenfassung ---	1
A	EP,A,0 315 976 (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO) 17.Mai 1989 siehe Abbildung 5 ---	1
A	EP,A,0 345 767 (ASEA BROWN BOVERI) 13.Dezember 1989 in der Anmeldung erwähnt siehe Zusammenfassung -----	1

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zumVerständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

1

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
5.Dezember 1995	20.12.95
Name und Postanschrift der Internationale Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+ 31-70) 340-3016	**Bevollmächtigter Bediensteter** Pelsers, L

Formblatt PCT/ISA/210 (Blatt 2) (Juli 1992)

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Interi. ales Aktenzeichen
PCT/CH 95/00215

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
EP-A-0315976	17-05-89	JP-A-	1190218	31-07-89
		JP-A-	1214223	28-08-89
		JP-A-	1283019	14-11-89
		JP-A-	1283020	14-11-89
		JP-A-	1126133	18-05-89
		JP-A-	1160322	23-06-89
		DE-D-	3887090	24-02-94
		DE-T-	3887090	19-05-94
		US-A-	4994932	19-02-91
EP-A-0345767	13-12-89	SE-B-	461306	29-01-90
		CA-A-	1331206	02-08-94
		DE-D-	68912409	03-03-94
		DE-T-	68912409	25-08-94
		JP-A-	2041619	09-02-90
		SE-A-	8802172	11-12-89
		US-A-	4961066	02-10-90