(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 44 34 819 C5** 2004.05.27

(12) # Geänderte Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **P 44 34 819.3**
(22) Anmeldetag: **29.09.1994**
(43) Offenlegungstag: **–**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **04.01.1996**
(45) Veröffentlichungstag des geänderten Patents: **27.05.2004**

(51) Int Cl.[7]: **H02H 9/02**

Patent nach Einspruchsverfahren beschränkt aufrechterhalten

(71) Patentinhaber:
ABB Research Ltd., Zürich, CH

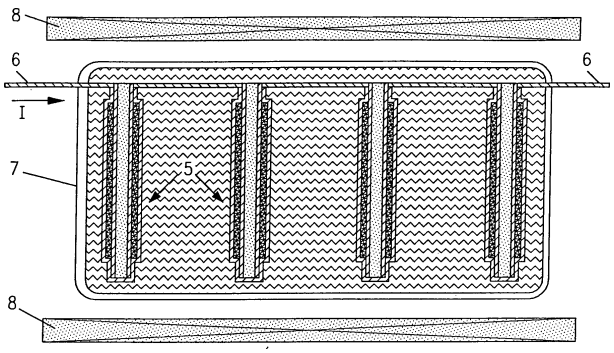
(74) Vertreter:
Zimmermann & Partner, 80331 München

(72) Erfinder:
Baumann, Thomas, Dr., Wettingen, CH; Paul, Willi, Dr., Wettingen, CH; Rhyner, Jakob, Dr., Zürich, CH

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 24 03 117 A
US-PS 51 538 04
US-PS 49 949 32
US 53 10 705 A
US 49 61 066
EP 05 23 374 A1
EP 05 03 448 A2
EP 04 06 636 A1
EP 03 15 460 A2
EP 02 85 147 A2
JP 02-1 83 915 A
Bosch von W. Buckel:"Supraleitung", 4. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990, S.236,
"Japanese Journal of Applied Physics", Vol.27, No.5, Mai 1998, Seiten L864-L866;
Lit."IEEE Trans. Magn.,"Vol. MAG-15, No.1, Jan.197
9, S.765-767;
EPRI-Bericht EL-328, Dez. 1976,"Superconducting Fault Current Limiter, Final Report", Argonne Nat. Lab.(US), S.5-1, 5-2;

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zur Strombegrenzung**

(57) Hauptanspruch: 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) sowohl eine erste Hauptfläche (1a) als auch
e) eine dieser gegenüberliegende zweite Hauptfläche (1b) eines Isolators (1, 1') mit jeweils einem Leiterverbund aus einem Supraleiter (3, 3') und einem Nebenschlußwiderstand (4, 4', 14, 15) in flächenhaftem Kontakt steht, dadurch gekennzeichnet,
f) daß jeder Leiterverbund als mäanderförmiges Band ausgebildet ist,
g) 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 und
h) daß eine...



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Bei der Erfindung wird ausgegangen von einer Vorrichtung zur Strombegrenzung nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Stand der Technik

[0002] Zum einschlägigen Stand der Technik wird zusätzlich auf die EP 0 406 636 A1 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.

[0003] Mit dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 nimmt die Erfindung auf einen Stand der Technik Bezug, wie er aus der JP 2-183915 A bekannt ist. Dort steht ein ebenflächiges Trägersubstrat über mindestens eine seiner beiden Hauptflächen über eine 0,01 µm – 10 µm dicke Schicht aus einem Edelmetall, wie z. B. Silber, die als chemische Barriere dient, mit einem Leiterverbund aus einem Hochtemperatursupraleiter und einem Edelmetall in flächenhaftem Kontakt. Die Schichtdicke des Hochtemperatursupraleiters liegt im Bereich vom 0,1 µm – 1 mm. Das Trägersubstrat kann ein metallischer Leiter sein. Ohne besondere geometrische Gestaltung, insbesondere bei Verwendung eines metallisch leitenden Trägersubstrates, ist diese Hochtemperatursupraleiteranordnung zur Begrenzung von Wechselströmen wenig geeignet.

[0004] Aus der EP 0 523 374 A1 ist ein mäanderförmiger, induktivitätsarmer, resistiver Strombegrenzer aus einem Hochtemperatursupraleiter bekannt, dessen wirksame elektrische Länge um mindestens das 3fache größer ist als seine lineare Ausdehnung. Im Bereich der Mäanderstege wird die durch eine Stromänderung induzierte Magnetfeldänderung nicht durch einen Strom in Gegenrichtung kompensiert.

[0005] Aus der US-A-5,310,705 ist es bekannt, zur Erzeugung von Magnetfeldern von > 4 T Hochtemperatursupraleiter mit Schichtdicken bis zu 5 µm spiralförmig anzuordnen. Dabei können mehrere Hochtemperatursupraleiterschichten unter Zwischenschaltung von 20 nm dicken Pufferschichten aus CeO_2, $LaAlO_3$, $SrTiO_3$, MgO oder ZrO_2 auf einer 250 µm dicken Saphirträgerschicht ein- oder beidseitig aufgebracht sein. Die jeweils äußere Hochtemperatursupraleiterschicht eines derartigen Schichtenaufbaus steht über eine 2 µm – 20 µm dicke Edelmetallschicht, z. B. aus Silber, mit einer 10 µm – 100 µm dicken Isolatorschicht aus Mylar oder Kevlar oder Teflon in flächenhaftem Kontakt.

[0006] Gemäß der EP 0 503 448 A2 ist ein supraleitender Strombegrenzer mit einem bandförmigen Leiter als bifilare Spule gewickelt.

[0007] Aus der US-A-4,961,066 ist es bekannt, zur schnellen Strombegrenzung bei Kurzschlüssen als Strombegrenzer einen stabförmigen, ein rohrförmigen und einen ebenflächigen Schichtaufbau, jeweils aus einem Träger-Isolator, einer flächenhaft darauf aufgebrachten dünnen supraleitenden Schicht sowie einer auf dieser flächenhaft aufgebrachten Widerstandsschicht eines Normalleiters, zu verwenden. 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.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0008] 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.

[0009] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen definiert.

[0010] 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.

[0011] 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.

[0012] 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.

Ausführungsbeispiel

[0013] Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

[0014] **Fig.** 1 eine modulare Anordnung von Strombegrenzern in einer Magnetfeldspule im Querschnitt,

[0015] **Fig.** 2 einen Strombegrenzer gemäß **Fig.** 1 im Querschnitt, **Fig.** 3 einen Supraleiter des Strombegrenzers gemäß **Fig.** 2 mit mäanderfömiger Leiter-

bahn in einem Querschnitt, **Fig.** 4 Signaldiagramme von Wechselstromverlusten mit Strombegrenzern und

[0016] **Fig.** 5–8 Strombegrenzer mit unterschiedlichen Schichtenfolgen.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

[0017] In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

[0018] **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.

[0019] **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.

[0020] 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).

[0021] 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 µΩ 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.

[0022] **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.

[0023] 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.

[0024] **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 (**1**) des Sup-

raleiters (**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.

[0025] 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.

[0026] 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.

[0027] 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.

[0028] **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.

[0029] **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.

[0030] 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.

[0031] 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**).

[0032] 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.

[0033] Im Betriebszustand muß der Supraleiter (**3**, **3'**) den Nennstrom (I_N) tragen können, was eine untere Grenze für seine Querschnittsfläche F ergibt gemäß:

$$F \geq 1{,}414 \cdot IN/j_c.$$

[0034] 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 (**1**) des Supraleiters (**3**, **3'**) gemäß:

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

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.

[0035] 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 Leiter-

segmenten 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 (**1**) ist gegeben durch:

$$P/1 = 4 \cdot j_c \cdot [-A(x_{ez}) \cdot F + \int A(x)\, df],$$

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 Δ » 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0038] 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.

[0039] 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.

[0040] Herstellung einer supraleitenden Platte (**1**): Supraleiterpulver der Zusammensetzung $Bi_aSr_bCa_c$-Cu_dO_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.

[0041] 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.

[0042] 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.

[0043] Bei Verwendung von Schmelzformen aus versilberter Nickelbasislegierung kann auf eine separate elektrische Stabilisierung verzichtet werden, wenn der Widerstand der Kombination Silber – Ni-

ckelbasislegierung schon demjenigen des Supraleiters (**3**, **3'**) entspricht.

[0044] 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 $\mu\Omega\ cm^2$. Bei einem Strom (I) von 1 kA baute das Strombegrenzermodul (**5**) einen Widerstand von 5 Ω auf.

Bezugszeichenliste

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**
dSL	Dicke von 3, 3'
d1	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) sowohl eine erste Hauptfläche (**1a**) als auch

e) eine dieser gegenüberliegende zweite Hauptfläche (**1b**) eines Isolators (**1**, **1'**) mit jeweils einem Leiterverbund aus einem Supraleiter (**3**, **3'**) und einem Nebenschlußwiderstand (**4**, **4'**, **14**, **15**) in flächenhaftem Kontakt steht, **dadurch gekennzeichnet**,

f) daß jeder Leiterverbund als mäanderförmiges Band ausgebildet ist,

g) 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 Leiterver-

bunde antiparallel fließt und
h) daß eine Mäanderstegbreite (b) des mäanderförmigen Bandes > $3{,}5 \cdot d_{SL}$ ist, d_{SL} = Dicke des Supraleiters (**3**, **3'**).

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mäanderstegbreite (b) des mäanderförmigen Bandes > $10 \cdot d_{SL}$ ist, d_{SL} = Dicke des Supraleiters (**3**, **3'**).

3. 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 **1** des Supraleiters (**3**, **3'**) gilt.

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

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 UN die Nennspannung einer Stromquelle und b die Streifenbreite eines Leiterverbundes aus Beipaßwiderstand (**4**, **4'**, **14**, **15**) und Supraleiter (**3**, **3'**) bedeuten.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Leiterabstand (Δ) 2er Supraleiter (**3**, **3'**) von Leiterverbunden beidseits des Isolators (**1**, **1'**), senkrecht zur Ebene des mäanderförmigen Bandes, kleiner als die Mäanderstegbreite (b) ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Leiterabstand (Δ) 2er Supraleiter (**3**, **3'**) < 10 mm ist.

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

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

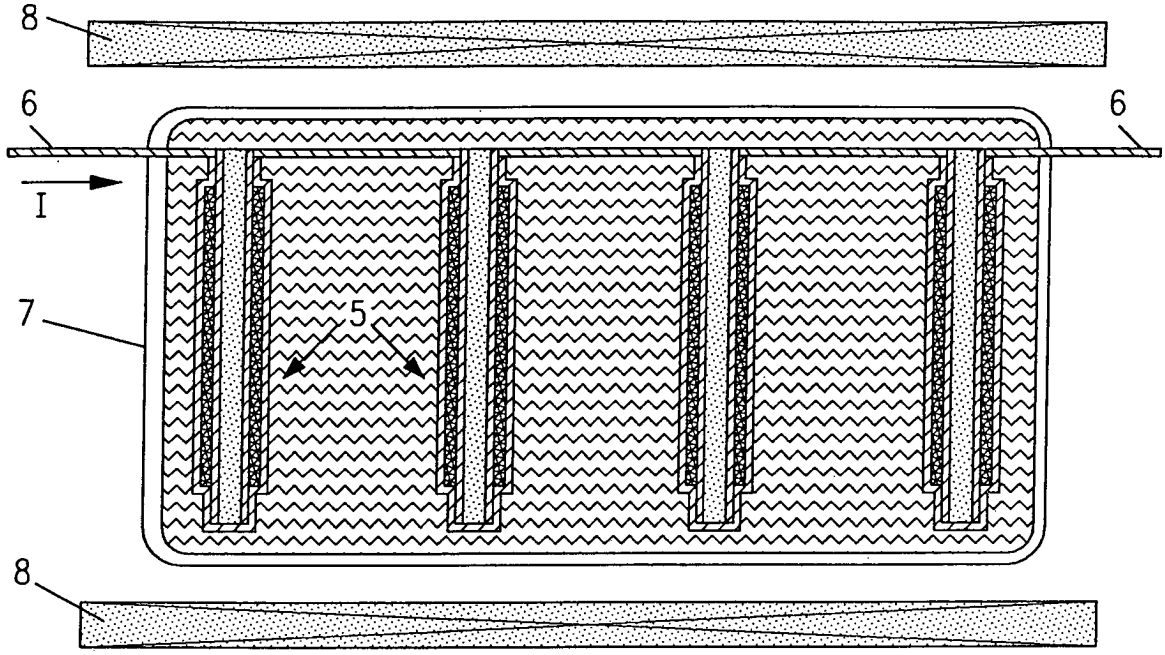


FIG.1

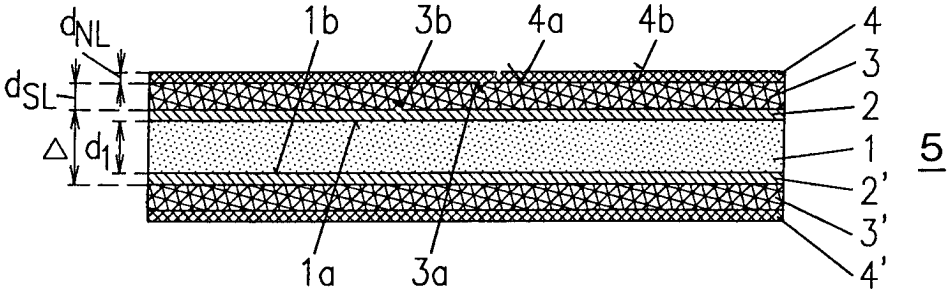


FIG.2

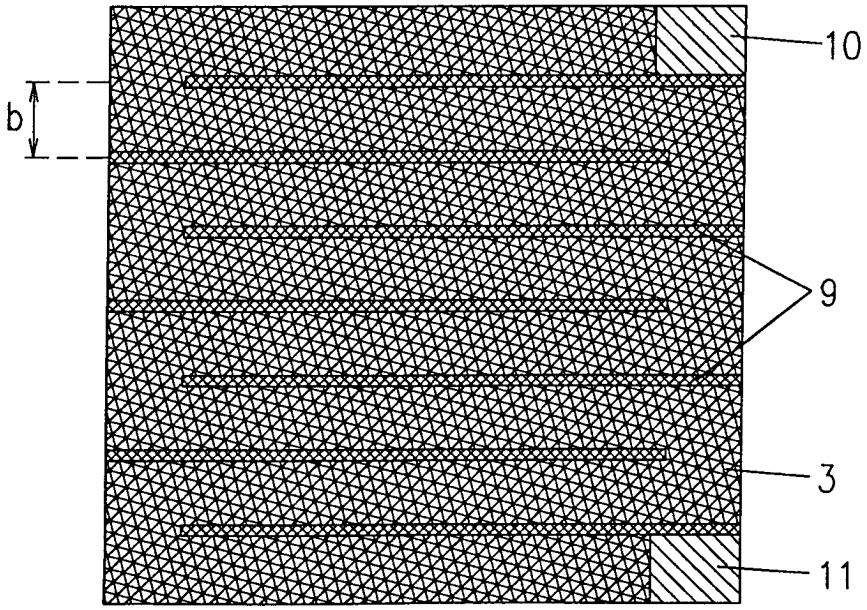


FIG.3

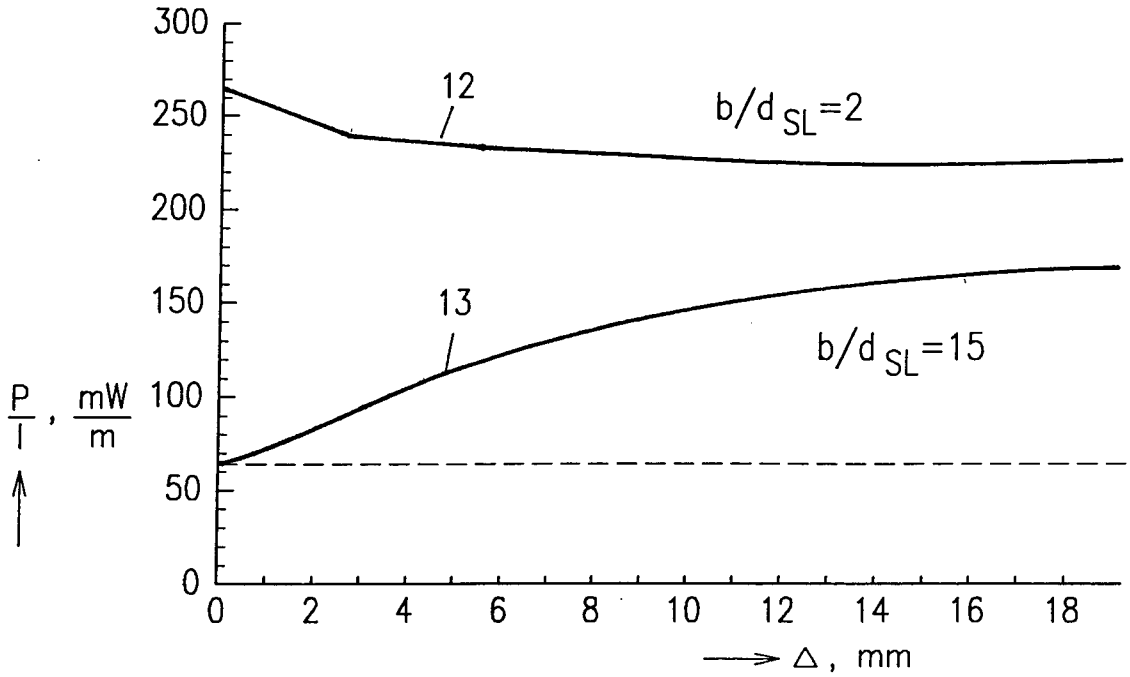


FIG.4

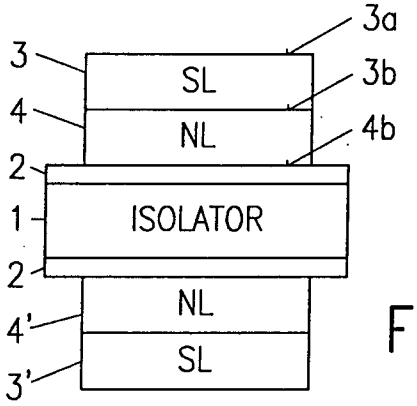


FIG.5

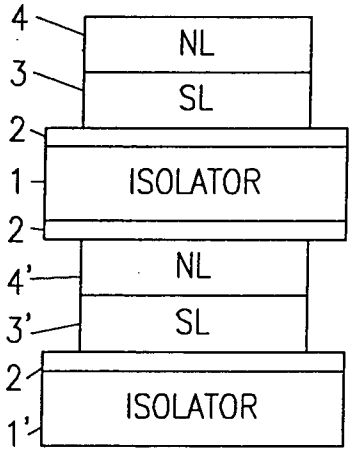


FIG.6

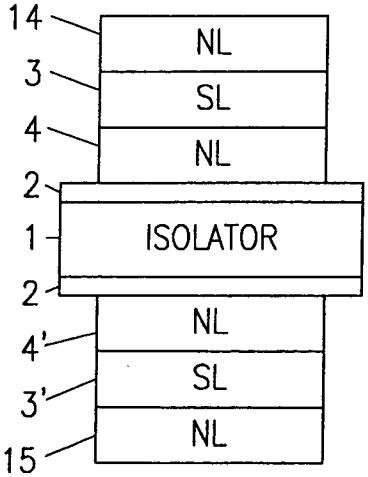


FIG.7

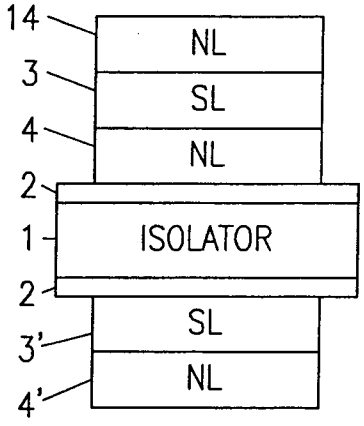


FIG.8