(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 199 64 555 B4** 2009.12.24

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **199 64 555.8**
(22) Anmeldetag: **17.06.1999**
(43) Offenlegungstag: **23.12.1999**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **24.12.2009**

(51) Int Cl.[8]: ***H01L 39/14*** (2006.01)
H01L 39/08 (2006.01)
H01L 39/22 (2006.01)
G01R 33/035 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten(§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
09/102,461 22.06.1998 US

(62) Teilung aus:
199 27 661.7

(73) Patentinhaber:
Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich, DE

(74) Vertreter:
Paul & Albrecht Patentanwaltssozietät, 41460 Neuss

(72) Erfinder:
Wördenweber, Roger, Dr., 52382 Niederzier, DE

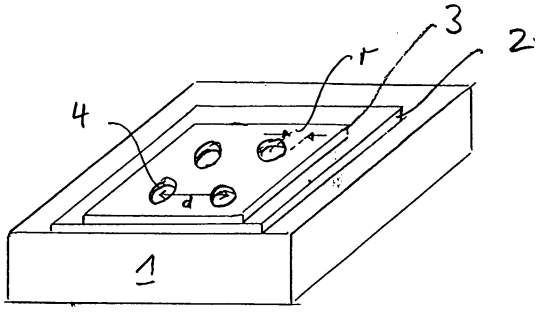
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

JEFFERY,M., (u.a.): Magnetic imaging of moat-guarded superconducting electronic circuits. In: Appl. Phys. Lett., vol. 67, no. 12, S. 1769-1771

CASTELLANOS,A., (u.a.): Preparation of regular arrays of antidots in YBa2Cu3O7 thin films and observation of vortex latice matching effects. In: Appl. Phys. Lett., vol. 71, no. 7, S. 962-964

(54) Bezeichnung: **Aktives Elektronikbauteil mit Anordnung aus Träger und supraleitendem Film sowie Meßanordnung**

(57) Hauptanspruch: Aktives Elektronikbauteil (40) mit einem durch Flußrauschen beaufschlagten aktiven Bauteilbereich (49; J1, J2, ..., J11) und einer Anordnung, die einen Träger (1; 26; 31; 41) und einen auf dem Träger (1; 26; 31; 41) angeordneten Film (3; 23, 24, 25; 32, 43) bestehend aus einem Supraleiter der ein Hochtemperatursupraleiter ist, umfaßt, wobei der Film (3; 23, 24, 25; 32, 43) mit einer Vielzahl von den Film (3; 23, 24, 25; 32, 43) durchsetzenden Löchern (4, 44) versehen ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Löcher einen Radius r im Bereich von 50 bis 2000 nm aufweisen und deren Anzahldichte über den Film (3, 23, 24, 25, 32, 43) örtlich derart variiert, dass in Bereichen höherer äußerer magnetischer Feldstärke, erhöhter Temperatur oder auch erhöhter Stromdichte eine besonders hohe lokale Anzahldichte von Löchern (4, 44) vorhanden ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein aktives Elektronikbauteil nach dem Oberbegriff von Anspruch 1.

[0002] In Solid State Commun. 91, 331 (1994), Metlushko, V. V. et al. ist ein Dünnfilm bestehend aus einem konventionellen Typ II-Supraleiter beschrieben, der mit einem periodischen Lochgittermuster durchsetzt ist. Die in dem supraleitenden Film bei ausreichend großem Magnetfeld auftretenden Flußschläuche ordnen sich in Form eines Gitters (Abrikosov-Gitter) an. Anhand einer Messung der Gleichstromleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Stärke eines äußeren Magnetfelds wird in dem Artikel eine Wechselwirkung zwischen dem Abrikosov-Gitter und dem aufgeprägten künstlichen Lochgitter nachgewiesen.

[0003] Ferner sind seit einigen Jahren Hochtemperatursupraleiter (HTSL) bekannt. Im Unterschied zu konventionellen Supraleitern können HTSL bereits bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) betrieben werden, wodurch sich der für die Kühlung erforderliche Aufwand drastisch reduziert. HTSL weisen jedoch den Nachteil auf, daß sie im supraleitenden Zustand eine im Vergleich zu konventionellen Typ II Supraleitern hohe Dissipation zeigen.

[0004] In der Hochfrequenztechnik, insbesondere im Mikrowellenbereich (300 MHz bis 300 GHz) ist es wünschenswert, in Wänden von Bauteilen wie beispielsweise Resonatoren oder Hohlleitern eine möglichst verlustfreie elektrische Leitung von Oberflächenströmen zu ermöglichen. Dadurch lassen sich wichtige HF-Eigenschaften der entsprechenden Bauteile wie bspw. Güte, Dämpfung usw. verbessern.

[0005] Zur Herabsetzung der ohmschen Verluste in Metalloberflächen von HF-Bauteilen ist es bereits bekannt, die Oberfläche zu polieren, zu plattieren oder eine Oberflächenvergütung bestehend aus einem Metall mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (Silber, Gold) vorzusehen.

[0006] Ferner ist es bereits bekannt, zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit bei HF-Bauelementen supraleitende Oberflächenschichten einzusetzen. Nachteilig ist jedoch, daß diese zur Aufrechterhaltung des supraleitenden Zustands unter ihre Sprungtemperatur T_c abgekühlt werden müssen, was häufig mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

[0007] In der elektrischen Leitungstechnik sind Bandleiter bekannt, die aus einem Bandträger bestehend aus einem elektrisch leitfähigen Material und einem darauf abgelagerten HTSL-Film bestehen.

[0008] Im Bereich der Meßtechnik sind SQUIDs (SQUID: Superconductive Quantum Interference Device) zur hochempfindlichen Messung von Magnetfeldern bekannt. Bei HTSL-SQUIDs ist nachteilig, daß die Meßempfindlichkeit durch ein verhältnismäßig hohes Niederfrequenzrauschen begrenzt wird.

[0009] Aus der Veröffentlichung „magnetic imaging of moat-guarded superconducting elektronic circuits", Appl. Phys. Lett. 67, S. 1769 bis 1771, 18. September 1995 ist ein aktives Elektronikbauteil bekannt, das als nächstkommender Stand der Technik betrachtet wird. Das aktive Bauteil ist ein Chip mit supraleitenden Schaltkreisen, die von verschiedenen Konfigurationen von Löchern oder Langlöchern in der supraleitenden Grundplatte umgeben sind. Die Löcher dienen dazu, das magnetische Flussrauschen in dem Bauteil zu reduzieren, indem der magnetische Fluss von den Löchern in der supraleitenden Grundplatte angezogen und einfangen wird. Die Löcher sind in Bereichen in denen der magnetische Fluss den geringsten Schaden bewirkt, angeordnet. Die verwendeten Löcher bzw. Langlöcher haben eine Größe von wenigstens $3 \times 10\ \mu m^2$, so dass ein Rundloch mit einer vergleichbaren Fläche einen Radius von etwa 3,1 µm aufweist. Die Löcher sind über die supraleitende Grundplatte mit gleichmäßigen Abständen verteilt, wobei nicht alle der Löcher magnetischen Fluss einfangen.

[0010] Aus der Veröffentlichung „Preparation of regular arrays of antidots in $Yba_2Cu_3O_7$ thin films and Observation of vortex lattice matching effects" Appl. Phys. Lett. 71(7), 18. August 1997 ist weiterhin bekannt, supraleitende Bandleiter vorzusehen, die einen „perforierten" HTSL-Film mit einer Vielzahl von Löchern aufweisen, welche in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind, um auf diese Weise die Bauteileigenschaften zu verbessern.

[0011] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Anordnung anzugeben, die in der Technik in vielfältiger Weise nutzbringend einsetzbar ist. Insbesondere zielt die Erfindung darauf ab, eine Anordnung zu schaffen, die es ermöglicht, HF-Bauteile mit wesentlich verbesserten Baueigenschaften, supraleitende Bandleiter mit höherer Stromfähigkeit und aktive supraleitende Elektronikbauteile mit einem niedrigeren Rauschpegel zu schaffen.

[0012] Zur Lösung der Aufgabe ist eine Anordnung gemäß den Merkmalen des Anspruchs 1 vorgesehen.

[0013] Die Erfindung basiert auf der Erkenntnis, beispielsweise in Bereichen höherer äußerer magnetischer Feldstärke, erhöhter Temperatur oder auch erhöhter Stromdichte eine besonders hohe lokale Anzahldichte von Löchern vorzusehen, wodurch in diesen gefährdeten Bereichen eine besonders hohe HF-Verträglichkeit, Stromtragfähigkeit oder Rauschunterdrückung geschaffen wird.

[0014] Löcher in dem in Anspruch 1 angegebenen Größenbereich können mittels bekannter Lithographietechniken wie beispielsweise Photolithographie, Elektronenstrahllithograpie oder Rönthgenstrahllithograpie in Kombination mit bekannten Ätzverfahren erzeugt werden. Vorzugsweise liegt der Radius der Löcher im Bereich von 500 bis 1000 nm, da Löcher in diesem Größenbereich in besonders einfacher Weise durch photolithographische Techniken hergestellt werden können.

[0015] Der mittlere Abstand d zwischen benachbarten Löchern, der Lochradius r und die Dicke t des Films können vorzugsweise so gewählt werden, daß die Ungleichung $B_{c1}\cdot(t/(d - 2r))^{0,5} \geq B$ erfüllt ist, wobei B_{c1} das untere kritische Feld des Supraleiters und B das äußere Magnetfeld bezeichnen. In diesem Fall sind sämtliche in dem Film auftretenden Flußschläuche an Löchern verankert, wodurch die erwähnten vorteilhaften Eigenschaften (Reduzierung des HF-Oberflächenwiderstandes, Erhöhung der Stromtragfähigkeit und Verminderung des Rauschens) der erfindungsgemäßen Anordnung in besonders ausgeprägter Weise realisiert werden.

[0016] Die Anordnung nach der Erfindung kann in vielen Bereichen der Technik eingesetzt werden. Vorteilhafte Anwendungsbereiche ergeben sich insbesondere in der HF-Technik für Resonatoren und HF-Leitungsbauteile in Koaxial- und Hohlleitertechnik sowie für integrierte (hybride oder monolithische) Mikrowellenschaltungen, bei supraleitenden Bandleitern und im Bereich der Rauschunterdrückung bei aktiven supraleitenden Elektronikbauteilen.

[0017] Ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung realisiert ein HF-Bauteil, das einen Hohlraumresonator umfaßt, in dessen Innenraum die erfindungsgemäße Anordnung wandseitig angeordnet ist. Hohlraumresonatoren werden in der Mikrowellentechnik für eine Vielzahl von Bauelementen eingesetzt. In der Nachrichtentechnik dienen sie beispielsweise als Sender oder Filter in Fernseh-, Radio-, Richtfunk,- oder Mobilfunkanlagen. Sie werden im Bereich der Satellitennavigation und der Radartechnik verwendet und dienen als Teilchenbeschleuniger in Synchrotrons. Durch die Integration der erfindungsgemäßen Anordnung in einem Hohlraumresonator wird die Güte des Hohlraumresonators erhöht.

[0018] In dem Innenraum des Hohlraumresonators kann ein dielektrisches Medium mit einer Dielektrizitätskonstante $\varepsilon > 1$ vorgesehen sein. In diesem Fall ist es bevorzugt, die erfindungsgemäße Anordnung benachbart zu dem dielektrischen Medium anzuordnen.

[0019] Der Hohlraumresonator kann vorzugsweise als Mehrkavitätenanordnung ausgebildet sein. Dadurch lasen sich bei einem als Filter eingesetzten Resonator die Filtereigenschaften verbessern (steilere Flanken) und es kann eine größere Bandbreite erzielt werden.

[0020] Eine weitere Ausführungsvariante der Erfindung im HF-Bereich kennzeichnet sich dadurch, dass die erfindungsgemäße Anordnung wandseitig in dem Innenraum eines Hohlleiters angeordnet ist. Auf diese Weise können Hohlleiter mit geringer Dämpfung realisiert werden, und es lassen sich die Übertragungs- bzw. Abschlusseigenschaften von Filtern, HF-Kopplern, HF-Transformatoren, HF-Abschlusswiderständen usw. verbessern.

[0021] Integrierte Mikrowellenschaltungen (MIC) sind in der Technik in Form von hybriden oder monolithischen Schaltungen an sich bereits bekannt. Bei hybriden integrierter Schaltungen werden einzelne, fertige Bauteile (Hybridelemente) zu einer Schaltung zusammengefügt, während bei monolithischen integrierten Schaltungen die gesamte Schaltung auf einem Halbleitersubstrat enthalten ist.

[0022] Die erfindungsgemäße HF-Anordnung kann vorzugsweise sowohl im Bereich hybrider als auch monolithischer Mikrowellenschaltungen zum Einsatz kommen. Im ersten Fall kennzeichnet sich eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung dadurch, dass der Träger als Bauteilträger ausgebildet ist, und dass der Film in einer für das HF-Bauteil charakteristischen Form strukturiert ist. Im zweiten Fall ist der Träger ein Halbleitersubstrat, auf dem eine integrierte Schaltung ausgebildet ist. In beiden Fällen wird die Mikrowellenverträglichkeit der integrierten Schaltung durch das Vorsehen des erfindungsgemäßen Films erhöht.

[0023] Nach einem zweiten bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung realisiert die erfindungsgemäße Anordnung durch Ausbildung des Trägers in Form eines elektrisch leitfähigen Bandleiters einen elektrischen Leiter. Derartige elektrische Leiter werden zur verlustarmen Übertragung von Strömen oder auch als Strombegrenzer („superconducting fault current limiter") eingesetzt.

[0024] Vorzugsweise können mehrere Lagen des mit dem Film beschichteten Bandleiterträgers zu einer Multifilamentleitung zusammengefasst sein. Ferner kann der Leiter in Form einer Spule ausgebildet sein.

[0025] Ein drittes bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung realisiert ein die erfindungsgemäße Anordnung umfassendes aktives Elektronikbauteil und kennzeichnet sich dadurch, daß das Elektronikbauteil einen durch Flußrauschen beaufschlagten aktiven Bauteilbereich aufweist, und daß sich die Anordnung entweder in unmittelbarer Umgebung des aktiven Bauteilbereichs befindet oder der aktive Bau-

teilbereich direkt in dem Film ausgebildet ist.

[0026] Durch die in der erfindungsgemäßen Anordnung von den Löchern ausgeübten starken attraktiven Kräfte ("pinning-forces") wird im Bereich des aktiven Bereichs eine Verankerung der Flußschläuche an den Löchern bewirkt. Durch die Verankerung wird eine thermisch angeregte "Flußschlauchwanderung" ("vortex hopping") unterbunden und auf diese Weise das Rauschen des aktiven Elektronikbauteils vermindert.

[0027] Eine vorteilhafte Realisierungsvariante des aktiven Elektronikbauteils kennzeichnet sich dadurch, daß der Film in Form eines einen inneren Freibereich umlaufenden und einen Josephson-Kontakt enthaltenden Ringes ausgebildet ist. Ein supraleitender Ring mit zumindest einem Josephson-Tunnelkontakt ist in der Technik als SQUID bekannt. Das niederfrequente Rauschen eines SQUIDs wird hauptsächlich durch Fluktuationen der Anzahl der den supraleitenden Ring durchlaufenden elementaren Flußquanten bestimmt. Um diese Fluktuationen gering zu halten, ist der den Ring bildende Freibereich vorzugsweise allseitig von den Löchern umgeben.

[0028] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0029] Die Erfindung wird nachfolgend in beispielhafter Weise unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. In dieser zeigt:

[0030] Fig. 1 ein schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anordnung;

[0031] Fig. 2a eine mit einem Rasterelektronenmikroskop aufgenommenes Bilder einer Anordnung nach Fig. 1;

[0032] Fig. 2b ein mit einem Kraftrastermikroskop aufgenommenes Bild einer weiteren Anordnung nach Fig. 1;

[0033] Fig. 3 ein Diagramm, das in schematischer Weise die Leistungsabhängigkeit des Mikrowellen-Oberflächenwiderstandes eines Supraleiters in einem Mikrowellenfeld bei zwei unterschiedlichen Kühltemperaturen T_1 und T_2 zeigt;

[0034] Fig. 4a eine schematische Querschnittansicht eines die erfindungsgemäße Anordnung enthaltenden Resonators gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

[0035] Fig. 4b den in Fig. 4a gezeigten Resonator bei abgenommenen Resonatordeckel in Draufsicht;

[0036] Fig. 5a, b, Fig. 5c perspektivische Ansichten weiterer HF-Bauteile der Hohlleitertechnik, die in ihrem Innenraum eine erfindungsgemäße Anordnung enthalten;

[0037] Fig. 6 eine schematische Darstellung eines HF-Bandpaßfilters in Draufsicht;

[0038] Fig. 7 ein Diagramm, das die kritischen Stromstärken einer erfindungsgemäßen YBCO-Dünnfilm-Anordnung mit Löchern und einer entsprechend dimensionierten YBCO-Dünnfilm-Anordnung ohne Löcher in Abhängigkeit von dem magnetischen Feld B bezogen auf B_m zeigt;

[0039] Fig. 8 eine schematische Seitenansicht eines erfindungsgemäßen elektrischen Bandleiters gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

[0040] Fig. 9 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen RF-HTSL-SQUIDs in Draufsicht mit angeschlossener Ansteuer- und Auswerteelektronik gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung;

[0041] Fig. 10 ein Diagramm, das in schematischer Weise das Niederfrequenzrauschen eines herkömmlichen HTSL-SQUIDs ohne Löcher und eines erfindungsgemäßen HTSL-SQUIDs mit Löcher in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld zeigt; und

[0042] Fig. 11 ein Schaltbild eines RSFQ-Schaltkreises.

[0043] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anordnung. Diese weist einen Träger **1** auf, der beispielsweise aus Saphir, $LaAlO_3$, MgO, $SrTiO_3$ bestehen kann und in nicht dargestellter Weise thermisch an eine Kühleinrichtung angekoppelt ist. Auf der Oberfläche des Trägers **1** ist hier eine beispielsweise aus CeO_2 bestehende Pufferschicht **2** einer Dicke von etwa 100 nm aufgebracht. Die optionale Pufferschicht **2** dient als ebenflächige Grundlage für einen darüber angeordneten supraleitenden Film **3** aus YBa_2Cu_3O, (YBCO), dessen Dicke t beispielsweise ebenfalls 100 nm beträgt.

[0044] Der YBCO-Film **3** ist mit im Querschnitt kreisscheibenförmigen Durchtrittslöchern **4** (auch als "antidots" bezeichnet) versehen, die beispielsweise durch photolithographische oder elektronenstrahllithographische Verfahren in den Film eingebracht werden können. Der Lochradius r sowie der (mittlere) Abstand d zwischen zwei benachbarten Löchern können dabei über einen weiten Bereich variieren und betragen im vorliegenden Beispiel r = 1 µm und d = 10 µm.

[0045] Die Sprungtemperatur T_c des derart mit Löchern **4** versehenen YBCO-Films **3** liegt über 77 K, so

daß flüssiger Stickstoff als Kühlmittel eingesetzt werden kann.

[0046] Fig. 2a zeigt ein mit einem Rasterelektronenstrahlmikroskop aufgenommenes Bild eines YBCO-Films **3'**, Der YBCO-Film **3'** wurde durch ein Hochdruck-Magnetron-Sputterverfahren als Dünnfilm auf die Pufferschicht **2** aufgebracht und weist eine sehr geringe Oberflächenrauhigkeit von weniger als 4 nm (von Spitze zu Spitze) auf. Der Lochradius beträgt r = 0,12 μm und der Abstand d zwischen benachbarten Löchern beträgt je nach Orientierung entweder 0,5 oder 1,0 μm.

[0047] Zur Strukturierung wurde der YBCO-Film **3'** mit einer Au/Nb/PMMA Dreischicht-Photoresistmaske abgedeckt. Die Lochstruktur wurde mittels Elektronenstrahllithographie und eines reaktiven Ätzschrittes unter Verwendung von SF_6 in der Photoresistmaske übertragen und durch einen Ar-Ionen Trockenätzschritt maßhaltig in den YBCO-Film **3'** transferiert.

[0048] Fig. 2b zeigt ein mit einem Rasterkraftmikroskop aufgenommenes Bild eines weiteren YBCO-Films **3"**. Der YBCO-Film **3"** weist ein quadratisches Lochmuster mit r = 0,12 μm und d = 1,0 μm auf. Die Strukturierung erfolgte ebenfalls durch ein elektronenstrahllithographisches Verfahren.

[0049] Fig. 3 dient der Erläuterung des Begriffs der HF-Verträglichkeit eines Supraleiters, der sich in einem HF-Feld befindet, das von einem Sender der HF-Leistung P erzeugt wird. Der Verlauf des HF-Oberflächenwiderstand R_s ist für zwei unterschiedliche Kühltemperaturen T_1 und T_2 dargestellt. Das dargestellte Verhalten ist qualitativer Natur und gilt in allgemeiner Weise für Supraleiter.

[0050] Fig. 3 zeigt, daß der HF-Oberflächenwiderstand R_s mit der angelegten HF-Leistung P bis zu einer charakteristischen Leistung P_{c1} bzw. P_{c2} leicht ansteigt und oberhalb der charakteristischen Leistung P_{c1} bzw. P_{c2} ein sprunghafter Anstieg des HF-Oberflächenwiderstands R_s eintritt.

[0051] Der sprunghafte Anstieg des HF-Oberflächenwiderstandes R_s wird durch einen plötzlichen Anstieg der Temperatur des Supraleiters beim Übergang in den normalleitenden Zustand verursacht. Bei der Leistung P_{c1} bzw. P_{c2} bricht die Supraleitung aufgrund von zu starker Erwärmung plötzlich zusammen (sog. Quench). Fig. 3 zeigt, daß der Supraleiter bei einer tieferen Kühltemperatur T_1 eine höhere charakteristische Leistung P_{c1} und damit eine höhere HF-Verträglichkeit aufweist als bei einer höheren Kühltemperatur T_2, bei der der Übergang bereits bei der charakteristischen Leistung P_{c2} stattfindet.

[0052] In der Praxis stellt sich die Temperatur T eines supraleitenden Films im HF-Feld durch die Konkurrenz zwischen der in dem Film dissipierten HF-Leistung (entspricht der zugeführten Wärme) und der Effizienz der Kühlung (bestimmt die abgeführte Wärme) ein. Eine Reduzierung des HF-Oberflächenwiderstands R_s führt daher bei konstanter Kühlung zu einer Erniedrigung der Temperatur des supraleitenden Films und somit zu einer Erhöhung der HF-Leistungsverträglichkeit.

[0053] Von wesentlicher Bedeutung ist nun, daß der erfindungsgemäße HTSL-Dünnfilm **3**, **3'**, **3"** einen deutlich kleineren HF-Oberflächenwiderstand R_s aufweist als ein HTSL-Dünnfilm entsprechender Dimensionierung ohne Löcher. Gemäß Fig. 3 ist daher seine HF-Leistungsverträglichkeit höher als die des entsprechenden HTSL-Dünnfilm ohne Löcher. Er bleibt daher auch bei höheren HF-Leistungen P noch supraleitend, d. h. einsatzfähig.

[0054] Im folgenden wird eine mögliche physikalische Erklärung für die Erniedrigung des HF-Oberflächenwiderstandes R_s der erfindungsgemäßen Anordnung vorgestellt.

[0055] Zunächst werden die physikalischen Ursachen für die Dissipation von HF-Feldenergie in einem herkömmlichen HTSL-Dünnfilm ohne Löcher betrachtet:
Dissipation in einem herkömmlichen HTSL-Dünnfilms kann auf zwei verschiedenen Ursachen beruhen. Zum einen können lokale Oberflächeninhomogenitäten (Defekte, normalleitende Ausscheidungen, mechanische Beschädigungen usw.) die Ursache für Dissipation im HTSL-Dünnfilm sein. Derartige Oberflächeninhomogenitäten sind mit einem wesentlich höheren HF-Oberflächenwiderstand R_s als der ungestörte Film behaftet. Die in ihnen dissipierte Leistung ist proportional zu dem Quadrat der magnetischen Feldstärke des HF-Wechselfeldes am Ort der Oberflächeninhomogenität und führt bei zunehmender HF-Leistungen zu einer lokalen Aufheizung (”hot spot”) nicht nur der Oberflächeninhomogenität sondern auch der benachbarten ungestörten (supraleitenden) Filmoberfläche, wobei dann auch dort der HF-Oberflächenwiderstand R_s aufgrund seiner Temperaturabhängigkeit zunimmt, d. h. die Dissipation weiter erhöht wird.

[0056] Zum anderen tragen sog. Magnetflußschläuche (auch Vortices genannt) zur Dissipation in dem HTSL-Dünnfilm **3**, **3'**, **3"** bei. Mit Überschreiten des sog. Penetrationsfeldes B_p (das von dem unteren kritischen Feld B_{c1} des HTSL-Typ II-Supraleiters und seiner Geometrie abhängt) können derartige Flußschläuche in den supraleitenden Film eintreten (sog. Shubkinov-Phase des Supraleiters). Jeder Flußschlauch (Vortex) besitzt einen normalleitenden Kern und trägt ein elementares Magnetflußquant ϕ_0, wobei $\phi_0 \approx 2 \cdot 10^{-15}$ Vs. Die Dissipation durch Flußschläuche

entsteht nun durch zwei Mechanismen, nämlich zum einen aufgrund einer Bewegung der Flußschläuche in dem Supraleiter (”Flußschlauchwanderung”) und zum anderen aufgrund von HF-Strömen, die durch das äußere HF-Wechselfeld in den normalleitenden Kernen der Flußschläuche hervorgerufen werden.

[0057] Zunächst konnte im Rahmen der Erfindung gezeigt werden, daß durch das Einbringen der Löcher **4** in den HTSL-Dünnfilm **3**, **3'**, **3''** offensichtlich keine den HF-Oberflächenwiderstand R_s erhöhenden Film-Inhomogenitäten geschaffen werden. Darüber hinaus werden die beiden letztgenannten Flußschlauch-Dissipationseffekte durch die Löcher **4** günstig beeinflußt: Einerseits bilden die Löcher **4** Verankerungszentren für die Flußschläuche, wodurch die Flußschlauchwanderung im HF-Feld wirksam unterdrückt wird. Andererseits weisen die an den Löchern **4** festgehaltenen Flußschläuche – anders als herkömmliche Flußschläuche – offensichtlich keinen normalleitenden Kern auf. Denn bei dem erfindungsgemäßen HTSL-Dünnfilm **3**, **3'**, **3''** mit Löchern tritt auch bei magnetischen Feldstärken oberhalb der Penetrationsfeldstärke eines herkömmlichen HTSL-Dünnfilms kein durch an den Löchern verankerte Flußschläuche bewirkter Dissipationsbeitrag auf.

[0058] **Fig.** 4 zeigt einen Resonator **5** in Zylinderbauweise mit einer Resonanzfrequenz der TM_{011}-Welle im GHz-Bereich. Der Resonator **5** weist eine kreisscheibenförmige Bodenplatte **6**, eine zylindrische Umfangswand **7** und einen Resonatordeckel **8** auf. Die Resonatorwandelemente **6**, **7** und **8** bestehen aus einem Metall guter elektrischer Leitfähigkeit wie beispielsweise Cu und definieren einen Hohlraum **9**. Auf der Oberfläche der Bodenplatte **6** ist eine erfindungsgemäße Anordnung bestehend aus einem Träger **1**, einer optionalen Pufferschicht **2** und einem YBCO-Film **3** aufgebracht. Ein aus einem dielektrischen Material mit hoher Dielektrizitätskonstante ε (beispielsweise aus Saphir oder Bariumtitanat-Zirkonat) bestehender Zylinder **10** ist im Hohlraum **9** zentral angeordnet. Durch die zylindrische Umfangswand **7** hindurch ragen in den Hohlraum **9** eine Einkoppelantenne **11a** und eine Auskoppelantenne **11b** hinein.

[0059] Bei Anregung des Resonators **5** durch Einkopplung von HF-Leistung über die Einkoppelantenne **11a** bildet sich in dem Hohlraum **9** ein stehendes elektromagnetisches Resonanzfeld aus. Ein Großteil der Feldenergie ist dabei in dem dielektrischen Zylinder **10** gespeichert.

[0060] Die Verluste des Resonators **5** setzten sich aus den dielektrischen Verlusten in dem dielektrischen Zylinder **10** und den dissipativen Wandstromverlusten in den Resonatorwänden zusammen. Da die höchste Mikrowellenleistung in unmittelbaren Umgebung des dielektrischen Zylinders **10** vorhanden ist, sind besonders die in der dem dielektrischen Zylinder **10** benachbarten Bodenplatte **6** auftretenden Verluste kritisch. Die Wirkungsweise der zwischen dem dielektrischen Zylinder **10** und der Bodenplatte **6** angebrachten erfindungsgemäßen Anordnung **1**, **2**, **3** besteht nun darin, die Bodenplatte **6** gegenüber dem Mikrowellenfeld abzuschirmen und dabei aufgrund ihres weitaus geringeren HF-Oberflächenwiderstands R_s verglichen mit Cu die Wandstromverluste deutlich zu vermindern. Dadurch wird die Güte des Resonators (definiert als das Produkt der Resonanzfrequenz ω_R mit dem Quotienten aus der in dem Resonator gespeicherten Feldenergie und der Verlustleitung) erhöht. Dies ist insbesondere bei hohen Resonanzfrequenzen ω_R von Vorteil, da die Güte von Hohlraumresonatoren zu hohen Frequenzen hin durch die Reduzierung der Baugröße proportional mit $\omega_R^{-0,5}$ abnimmt.

[0061] Fig. 4b zeigt den Innenraum **9** des Resonators **5** bei abgehobenem Resonatordeckel **8** und nicht dargestellten Ein-/Auskoppelantennen **11a**, **11b** in Draufsicht. Die Löcher **4** des auf dem nicht erkennbaren Träger **1** angeordneten YBCO-Dünnfilms **3** sind hier in einem quadratischen Muster mit konstanten Abständen d zwischen den Löchern **4** angeordnet. In nicht dargestellter Weise kann jedoch auch eine erhöhte Lochdichte im Bereich des dielektrischen Zylinders **10** vorgesehen sein. Dadurch wird die HF-Verträglichkeit des YBCO-Dünnfilms **3** im Bereich des dielektrischen Zylinders **10** erhöht, so daß der Resonator **5** insgesamt mit einer höheren Leistung P betrieben werden kann.

[0062] Die erfindungsgemäße Anordnung kann in allen bekannten Hohlraumresonatortypen (zylindrisch, quaderformig, mit- und ohne Dielektrikum usw.) zum Einsatz kommen, wobei die Resonatorwände je nach dem konkreten Anwendungsfall und der zugrundeliegenden Resonatorgeometrie entweder teilflächig oder auch ganzflächig mit der erfindungsgemäßen Anordnung bestückt werden können.

[0063] Die erfindungsgemäße Anordnung kann auch in Koaxial- oder Hohlleitern integriert werden. Einige diesbezügliche Ausführungsvarianten sind in den Fig. 5a, b und c dargestellt.

[0064] Fig. 5a zeigt einen Breitschlitzkoppler **12**, der zwei parallel verlaufende Hohlleiter **13**, **14** umfaßt, die über Verbindungsschlitze **15** in einer gemeinsamen Trennwand **16** miteinander in Verbindung stehen. Durch geeignete Dimensionierung der Verbindungsschlitze **15** lassen sich die Kopplungseigenschaften nach Wunsch bestimmen. Die erfindungsgemäße Anordnung kann teil- oder ganzflächig an den Innenwänden (insbesondere auch der Trennwand **16**) der Hohlleiter **13**, **14** angeordnet sein, wobei insbesondere die mit einer hohen HF-Leistung

beaufschlagten Wandbereiche von der erfindungsgemäßen Anordnung bedeckt sind.

[0065] Fig. 5b zeigt eine perspektivische Darstellung einer λ/4-Leitung, die auch als λ/4-Transformator bezeichnet wird. Sie besteht aus drei hintereinander geschalteten Hohlraumsegmenten **17**, **18**, **19**, die jeweils eine Länge von λ/4 aufweisen. Die λ/4-Leitung wird als Zwischenleitung zur Anpassung zweier nicht dargestellter HF-Leitungen mit unterschiedlichen Leitungswiderständen verwendet. Die erfindungsgemäße Anordnung befindet sich in nicht sichtbarer Weise im Inneren der λ/4-Leitung insbesondere an mit hoher HF-Leistung beaufschlagten Wandflächen.

[0066] Fig. 5c zeigt ein dreipoliges HF-Kammerfilter **20**, das aus einem Hauptwellenleiter **21** besteht, an den drei seitliche Kammerfortsätze **22** der Länge λ/4 angeschlossen sind. Die erfindungsgemäße Anordnung kann beispielsweise wandseitig in den Kammerfortsätzen **22** und dort insbesondere an Stellen hoher HF-Leistung vorgesehen sein.

[0067] Weitere Einsatzbereiche der erfindungsgemäßen Anordnung liegen im Bereich der Technologie hybrider oder monolithischer integrierter Mikrowellenschaltungen MIC (MIC: microwave integrated circuit). MIC werden üblicherweise in Dünnfilm-Planartechnik gefertigt und eignen sich daher besonders gut für die vorliegende Erfindung.

[0068] Fig. 6 zeigt als Beispiel für ein HF-Hybrid-Bauelement ein 5-poliges Bandpaßfilter. Das Bandpaßfilter umfaßt einen Träger **26** aus einem dielektrischen Material mit guten Wärmeleiteigenschaften, bspw. Saphir, über dem entsprechend dem in Fig. 1 dargestellten Aufbau eine optionale CeO_2-Pufferschicht (nicht dargestellt) und ein YBCO-Dünnfilm angeordnet sind. Im Unterschied zu der in Fig. 1 dargestellten Anordnung ist der YBCO-Dünnfilm hier in einem die Bauteileigenschaften bestimmenden Streifenmuster strukturiert. Das Streifenmuster umfaßt einen λ/4-Eingangsstreifen **23**, fünf λ/2-Streifen **24** und einen λ/4-Ausgangsstreifen **25**, die sämtlich parallel zueinander ausgerichtet sind. Die HF-Leistung wird am Eingangsstreifen **23** zugeführt und über die parallel geschalteten Streifen **24** zum Ausgangsstreifen **25** übertragen. Durch eine weitere Erhöhung der Zahl der Streifen **24** können die Filtereigenschaften verbessert werden.

[0069] In Fig. 6 ist graphisch angedeutet, daß die Lochdichte an den Längsrandbereichen der einzelnen Streifen **23**, **24** und **25** sowie in den Bereichen der Streifenlängsmitten lokal vergrößert ist. Dem liegt zugrunde, daß durch die Streifengeometrie an den Längsrandbereichen der Streifen **23**, **24**, **25** eine Stromerhöhung auftritt und daß sich bei Resonanz in den Streifenlängsmitten Schwingungsmaxima des HF-Feldes einstellen. Durch die Vergrößerung der Lochdichte in derartigen Bereichen erhöhter HF-Belastung wird die HF-Festigkeit des Bauteils weiter erhöht.

[0070] Weitere Hybrid-Streifenleitungsbauteile wie beispielsweise Widerstände, Kapazitäten, Induktivitäten sowie Streifenleitungskoppelglieder und Streifenleitungsresonatoren können in entsprechender Weise unter Verwendung der erfindungsgemäßen Anordnung realisiert werden. Auch bei diesen Bauteilen kann die Lochdichte in den durch die Formgebung oder die Resonanzeigenschaften des Bauteils bedingten kritischen Bereichen hoher HF-Belastung erhöht sein.

[0071] Ferner können auch monolithische MIC in entsprechender Aufbauweise realisiert werden. Als Träger wird hierbei ein Halbleitersubstrat eingesetzt, wobei der in geeigneter Weise strukturierte und mit Löchern versehene YBCO-Dünnfilm bspw. durch Sputtern und ggf. unter Verwendung einer zwischen dem Halbleitersubstrat und dem YBCO-Dünnfilm angeordneten Isolierschicht auf das Halbleitersubstrat aufgebracht wird.

[0072] Die erfindungsgemäße Anordnung kann auch außerhalb des HF-Bereichs eingesetzt werden.

[0073] Fig. 7 zeigt ein Diagramm, in dem die kritische Stromstärke I_c für Gleichstrom in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke B bezogen auf B_m aufgetragen ist, wobei $B_m = \phi_0/d^2$ die Feldstärke ist, die einer Flußschlauchdichte von einem Flußschlauch pro Gitterloch entspricht. Die Meßpunkte **27** geben die kritische Gleichstrom-Stromstärke I_c eines YBCO-Dünnfilms ohne Löcher wieder, während die Meßpunkte **28** die kritische Gleichstrom-Stromstärke I_c eines identisch präparierten aber in erfindungsgemäßer Weise mit Löchern (Lochabstand d) versehenen YBCO-Dünnfilms angeben. Aus Fig. 7 ist ersichtlich, daß die kritische Gleichstrom-Stromstärke I_c des mit Löchern versehenen YBCO-Films nahezu um den Faktor 3 größer ist als die des entsprechenden YBCO-Films ohne Löcher. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der mit Löcher versehene YBCO-Dünnfilm aufgrund des durch die Löcher bewirkten Materialverlustes einen deutlich geringeren Querschnitt für die Stromleitung als der YBCO-Dünnfilm ohne Löcher aufweist.

[0074] Es wird angenommen, daß die erhöhte kritische Stromstärke I_c für Gleichstrom des mit Löchern versehenen YBCO-Dünnfilms auf die Unterdrückung der Flußschlauchwanderung durch Verankerung von Flußschläuchen an den Löchern zurückzuführen ist.

[0075] Fig. 8 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen elektrischen Bandleiters **30**. Der Bandleiter **30** weist einen in Form eines Metallbands

31 ausgebildeten Bandleiterträger **31** auf. Das Metallband **31** besteht beispielsweise aus Hastelloy und ist mit einer polierten Oberfläche mit hoher Oberflächenebenheit versehen. Die polierte Oberfläche des Metallbands **31** wird mit einer hier nicht dargestellten bi-axialen Pufferschicht beschichtet, die beispielsweise aus Y-stabilisiertem ZrO_2 (sogenanntes YSZ) gebildet sein kann. Zur Beschichtung kann das IBAD-(Ion Beam Assisted Deposition-)Verfahren verwendet werden, bei dem während der Beschichtung die sich bildende YSZ-Pufferschicht mit Ionen unter einem definierten Winkel beschossen wird, so daß sich eine in der Schichtebene liegende Textur ausbildet. Anschließend werden auf der YSZ-Pufferschicht epitaktische YBCO-Schichten in Form eines Films **32** abgeschieden und dann in der zuvor beschriebenen Weise mit einem Lochmuster versehen Der Bandleiter **30** weist somit den in Fig. 1 dargestellten Grundaufbau auf. Der auf diese Weise erhaltene YBCO-Film **32** zeigt ähnlich gute Eigenschaften wie ein auf einem einkristallinen Träger (beispielsweise Saphir, $LaAlO_3$, MgO, $SrTiO_3$) abgeschiedener YBCO-Film.

[0076] Eine weitere Möglichkeit der Herstellung des erfindungsgemäßen Bandleiters **30** besteht darin, den Bandleiterträger **31** durch ein Walz- oder Ziehverfahren aus einem Metallmaterial (beispielsweise Ag) zu fertigen und den YBCO-Film **32** durch ein Tauchverfahren in einer organometallischen Lösung und einem nachfolgenden Pyrolyseschritt auf der Bandleiteroberfläche aufzubringen.

[0077] Die Wirkungsweise des erfindungsgemäßen Bandleiters **30** ist wie folgt:
Wird ein Strom durch den Bandleiter **30** geschickt, stellen der (supraleitende) YBCO-Film **32** und der Bandleiterträger **31** parallel geschaltete Stromleitungspfade dar. Da der elektrische Widerstand des supraleitenden YBCO-Films **32** wesentlich geringer als derjenige des Bandleiterträgers **31** ist, erfolgt der Stromfluß nahezu ausschließlich in dem supraleitenden YBCO-Film **32**. Dabei kann der erfindungsgemäße Bandleiter **30** wegen der in Fig. 7 dargestellten Erhöhung der kritischen Stromstärke I_c einen deutlich höheren Strom transportieren als ein vergleichbar aufgebauter supraleitender YBCO-Film-Bandleiterträger ohne Löcher im YBCO-Film.

[0078] Der in Fig. 8 gezeigte Bandleiter **30** kann auch als ein Strombegrenzer ausgelegt sein. Bei Überschreiten der kritischen Stromstärke I_c und dem damit verbundenen Zusammenbrechen der Supraleitung im YBCO-Film **32** wird der den Bandleiter durchfließende Strom auf einen Wert reduziert, welcher nun durch den ohmschen Widerstand des Bandleiterträgers **31** vorgegeben ist und durch eine entsprechende Dimensionierung und/oder Materialwahl desselben nach Wunsch einstellbar ist.

[0079] Ein drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in Fig. 9 dargestellt.

[0080] Fig. 9 zeigt einen RF-HTSL-SQUID **40**, der durch eine geeignete Strukturierung des YBCO-Dünnfilms **3** der in Fig. 1 dargestellten Anordnung gefertigt werden kann.

[0081] Der RF-SQUID **40** weist einen beispielsweise aus Saphir, $LaAlO_3$, MgO oder $SrTiO_3$ bestehenden Träger **41** auf, auf dem in der bereits beschriebenen Weise ggf. unter Verwendung einer CeO_2-Pufferschicht ein YBCO-Dünnfilm **43** aufgebracht ist. Im zentralen Bereich des Dünnfilms **43** ist ein quadratischer Freiraum **45** ausgebildet, wodurch der YBCO-Dünnfilm **43** die Form eines Ringes aufweist. Ferner ist in dem YBCO-Dünnfilm **43** eine stegförmige Aussparung **46** vorgesehen, die sich von einem Rand **47** des YBCO-Dünnfilms **43** in Richtung des zentralen Freiraums **45** erstreckt und kurz vor Erreichen des Freiraums **45** endet.

[0082] Zwischen dem freiraumseitigen Ende **48** der Aussparung **46** und dem Freiraum **45** ist in einem brückenartigen Abschnitt des YBCO-Dünnfilms **43** ein Josephson-Tunnelkontakt **49** ausgebildet. Der Josephson-Tunnelkontakt **49** kann in vielfältiger Weise realisiert sein. Beispielsweise kann er infolge einer Stufenausbildung des Trägers **41** oder in Form einer Verjüngungsstelle des Dünnfilms **43** gebildet sein.

[0083] Der YBCO-Dünnfilm **43** ist in der bereits beschriebenen Weise mit Löchern **44** versehen, die in dem dargestellten Beispiel in einem quadratischen Gitter angeordnet sind und den zentralen Freiraum **45** allseitig umgeben.

[0084] Ein nicht dargestellter, ebenfalls von der Erfindung umfaßter DC-HTSL-SQUID unterscheidet sich von dem gezeigten RF-HTSL-SQUID **40** im wesentlichen nur dadurch, daß in dem Ring anstelle eines Josephson-Tunnelkontaktes **49** zwei derartige Kontakte ausgebildet sind.

[0085] Bei einer nicht dargestellten alternativen Ausführungsform eines SQUIDs ist der supraleitende Ring mit Josephson-Kontakt(en) nicht als Struktur in dem Film **3** der erfindungsgemäßen Anordnung ausgebildet, sondern wie üblich in Planarbauweise auf einem gesonderten Chip vorgesehen. Die Rauschunterdrückung wird dann dadurch erreicht, daß eine erfindungsgemäße Anordnung **1**, **2**, **3** gemäß Fig. 1 einfach in ”flip-chip”-Konfiguration, d. h. mit dem mit Löchern **4** versehenen Film **3** kopfüber auf den den SQUID tragenden Chip aufgelegt und an diesem fixiert wird. Dabei muß der Josephson-Kontakt (bzw. die Josephson-Kontakte) nicht notwendigerweise von der erfindungsgemäßen Anordnung überdeckt sein. Wichtig ist nur, daß der mit Löchern versehene YBCO-Film **3** der Anordnung derart auf dem Ring des

SQUIDs plaziert, daß ein fluktuatives Eindringen von Flußschläuchen in das Ringinnere verhindert wird.

[0086] Zum Betrieb des RF-HTSL-SQUIDs **40** ist dieser über eine Spule **51** induktiv an eine Ansteuer- und Auswerteschaltung **50** angekoppelt. In der Zuleitung zu der Spule **51** befindet sich eine Kapazität **52**. Die Spule **51** und die Kapazität **52** bilden einen Schwingkreis, der mit einer RF-Wechselspannung im Bereich von bspw. 100–800 MHz betrieben wird. Die Ansteuer- und Auswerteschaltung **50** weist eine Frequenz-Messeinrichtung auf, mittels der eine Frequenzverstimmung des Schwingkreises **51**, **52** nachgewiesen wird.

[0087] Die Wirkungsweise des RF-HTSL-SQUIDs **40** basiert auf dem folgenden Prinzip:
Aufgrund der Flußquantisierung beträgt der magnetische Fluß im supraleitenden Ring (Freiraum **45**) immer ein Vielfaches des elementaren Flußquants ϕ_0. Wird das äußere Magnetfeld B verändert, so wird in dem Ring ein Abschirmstrom induziert, der bewirkt, daß der magnetische Fluß im Ring unverändert bleibt. Aufgrund des Josephson-Kontaktes **49** kann der Abschirmstrom einen maximalen Wert nicht überschreiten. Erreicht der Abschirmstrom diesen durch den Josephson-Kontakt **49** bedingten maximalen Wert, so ändert sich der den Ring durchsetzende magnetische Fluß auf ein anderes Vielfaches von ϕ_0. Durch entsprechende Dimensionierung des Josephson-Kontaktes **49** kann nun die Größe des maximalen Abschirmstroms so eingestellt werden, daß Änderungen von einem ϕ_0 nachgewiesen werden können.

[0088] Durch den an den RF-HTSL-SQUID **40** angeschlossenen Schwingkeis **51**, **52** wird bewirkt, daß der magnetische Fluß ständig um ein ϕ_0 oszilliert. Dies ermöglicht, daß Änderungen des äußeren magnetischen Flusses von einem Bruchteil von ϕ_0 nachgewiesen werden können. Dabei wird mit Hilfe der Ansteuer- und Auswerteschaltung **50** ein zusätzlicher Kompensationsstrom in den Ring eingespeist, der bewirkt, daß eine äußere Flußänderung stets kompensiert wird (”flux-locked-loop-mode”).

[0089] Fig. 10 zeigt in qualitativer Form das niederfrequente Rauschverhalten (Gesamtrauschen im Bereich von bspw. 1–10 Hz) eines herkömmlichen HTSL-SQUIDs ohne Löcher (Kennlinie **53**) und eines erfindungsgemäßen HTSL-SQUIDs mit Löcher (Kennlinie **54**) in Abhängigkeit von dem äußeren Magnetfeld B.

[0090] Bei einem äußeren Magnetfeld B unterhalb der Penetrationsfeldstärke B_{po} des HTSL-Dünnfilms ohne Löcher (beispielsweise B_{p0} = 5 μT) zeigen die beiden Kennlinien **53** und **54** einen identischen Verlauf; das niederfrequente Rauschen ist gering.

[0091] Überschreitet das äußere Magnetfeld B die Penetrationsfeldstärke B_{po} des HTSL-Dünnfilms ohne Löcher, erhöht sich das Rauschen $S^{0,5}$ bei einem herkömmlichen HTSL-SQUID proportional zu $B^{0,5}$. Demgegenüber bleibt das Rauschen bei einem erfindungsgemäßen HTSL-SQUID **40** auch bei $B > B_{p0}$ auf niedrigem Niveau (siehe Kennlinie **54**).

[0092] Dem liegt die folgende Ursache zugrunde:
Mit Erreichen der Penetrationsfeldstärke B_{p0} dringen bei einem herkömmlichen HTSL-Dünnfilm (ohne Löcher) magnetische Flußschläuche in den HTSL-Dünnfilm ein. Die Flußschläuche lagern sich an Gitterstörstellen oder anderen in dem HTSL-Dünnfilm vorhandenen Haftzentren an. Die entsprechenden Bindungsenergien sind jedoch so gering, daß es bei den herrschenden Temperaturen von 77 K und mehr zu einer thermisch angeregten Bewegung (”vortex hopping”) der Flußschläuche in dem HTSL-Dünnfilm kommt. Dies hat Fluktuationen des den Ring durchsetzenden magnetischen Flusses und somit das Entstehen von Rauschen zur Folge.

[0093] Wie bereits erwähnt, bilden die Löcher **44** des erfindungsgemäßen Dünnfilms **43** künstliche Verankerungszentren für Flußschläuche, die ein wesentlich höheres attraktives Potential für Flußschläuche als die ”natürlichen” Haftzentren aufweisen. Dies hat zur Folge, daß sich nicht-verankerte Flußschläuche in Bereichen zwischen den Löchern **44** erst bei einer magnetischen Feldstärke B_p (Penetrationsfeldstärke des mit Löchern **44** versehenen Dünnfilms **43**) bilden, die größer als die Penetrationsfeldstärke B_{p0} des nicht mit Löchern versehenen Films ist.

[0094] B_p ist von dem Lochradius r, dem Lochabstand d und der Dicke t des Dünnfilmes **43** abhängig und ist durch die Gleichung

$$B_p = B_{c1} \cdot (t/(d - 2r))^{0,5}$$

bestimmt.

[0095] Da an den Löchern festgehaltene Flußschläuche nicht zum Rauschen des SQUIDs **40** beitragen, tritt Flußrauschen erst bei Erreichen des Penetrationsfeldes B_p auf. Das Maß der Rauschverminderung hängt dann u. a. von der maximale Anzahl n von Flußschläuchen ab, die jedes Loch **44** festhalten kann. Da die maximale Anzahl n gerade beim Einsetzen des Eindringens von Flußschläuche in Bereiche zwischen den Löchern **44** (d. h. bei $B = B_p$) realisiert ist, folgt

$$n = B_{c1} \cdot (d^2/\phi_0) \cdot (t/(d - 2r))^{0,5}$$

[0096] Ein weiterer zur Rauschverminderung beitragender Effekt besteht darin, daß auch nicht an Löchern verankerte Flußschläuche (die bei $B > B_p$ auftreten können) einen geringeren Rauschbeitrag als

im Fall eines YBCO-Films ohne Löcher liefern, da sie vorzugsweise an von dem Lochgitter definierten "Zwischenlochplätzen" gepinnt werden und somit ebenfalls in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind.

[0097] Ferner kann durch eine Anordnung der Löcher **44** in einem quadratischen oder hexagonalen Lochgittermuster die Verankerungsfestigkeit der in dem HTSL-Dünnfilm **43** vorhandenen Flußschläuche weiter erhöht werden, weil dann die den Flußschläuchen angebotene örtliche Verteilung der Verankerungszentren (Löcher) bereits den beiden energetisch bevorzugten Anordnungen ungebundener Flußschläuche entspricht.

[0098] Die am Beispiel eines RF-HTSL-SQUIDs **40** erläuterte Rauschunterdrückung kann in erfindungsgemäßer Weise auch an anderen aktiven supraleitenden Elektronikbauteilen, in denen Flußrauschen auftritt, angewandt werden.

[0099] Beispielsweise sind bereits SFQ-(Single Flux Quantum-) oder RSFQ-(Rapid Single Flux Quantum-)Logikschaltkreise bekannt, die im wesentlichen aus einer Mehrzahl von Josephson-Tunnelkontakten bestehen, welche die grundlegenden Schaltelemente eines solchen Logikschaltkreises darstellen und über elektrische Leitungswege auf geeignete Weise miteinander in Verbindung stehen. Vom Aufbau her können diese SFQ- oder RSFQ-Logikschaltkreise ähnlich wie übliche mikroelektronische Logikschaltkreise ausgebildet und in Chipbauweise realisiert sein.

[0100] Fig. 11 zeigt das Schaltbild eines solchen an sich bereits bekannten RSFQ-Logikschaltkreises. Dabei sind mit J1, J2, ..., J11 Josephson-Tunnelkontakte, mit R1, R2, ..., R5 elektrische Widerstände und mit L1, L2, ..., L12 Impedanzen bezeichnet. IG, IB und Ia bezeichnen Signalleitungen, an denen logische Signale anliegen.

[0101] Ein Problem derartiger Logikschaltkreise mit Josephson-Tunnelkontakten war bisher neben der reproduzierbaren Herstellung der Tunnelkontakte insbesondere die Unterdrückung von Störungen durch eingefangenen magnetischen Fluß in Form von einzelnen Flußquanten. Diese Flußquanten führen durch Flußsprünge (Flußfluktuationen) zu einer starken Erhöhung der Fehlerraten solcher Schaltkreise.

[0102] Bei einem erfindungsgemäßen Logikschaltkreis, der beispielsweise gemäß Fig. 11 aufgebaut sein kann, ist ein erfindungsgemäßer, mit Löchern versehener HTSL-Film (siehe Fig. 1) in der zum Rauschen beitragenden Umgebung der Josephson-Kontakte J1, J2, ..., J11 angeordnet, so daß dort der magnetische Fluß gezielt gepinnt wird. Beispielsweise können die Josephson-Kontakte J1, J2, ..., J11 wie in Fig. 9 direkt in einem mit Löchern versehenen HTSL-Film **43** ausgebildet sein oder es ist auch möglich, einen HTSL-Film mit Löchern in der bereits erwähnten flip-chip Konfiguration von oben auf den gesamten Logikschaltkreis oder gezielt auf die zum Rauschen beitragenden Bereiche des Logikschaltkreises aufzubringen. Dadurch kann die Fehlerrate eines solchen Logikschaltkreises deutlich verringert werden.

[0103] Erfindungsgemäße SFQ- und RSFQ-Logikschaltkreise weisen ein breites Anwendungsspektrum auf und können in einfachen Schaltungen (beispielsweise AD-Konverter), komplexeren Schaltungen (beispielsweise digitales SQUID-Bauelement) sowie auch in hochintegrierten Schaltungen (beispielsweise Speicherschaltungen und digitale Logik) zum Einsatz kommen.

Patentansprüche

1. Aktives Elektronikbauteil (**40**) mit einem durch Flußrauschen beaufschlagten aktiven Bauteilbereich (**49**; J1, J2, ..., J11) und einer Anordnung, die einen Träger (**1**; **26**; **31**; **41**) und einen auf dem Träger (**1**; **26**; **31**; **41**) angeordneten Film (**3**; **23**, **24**, **25**; **32**, **43**) bestehend aus einem Supraleiter der ein Hochtemperatursupraleiter ist, umfaßt, wobei der Film (**3**; **23**, **24**, **25**; **32**, **43**) mit einer Vielzahl von den Film (**3**; **23**, **24**, **25**; **32**, **43**) durchsetzenden Löchern (**4**, **44**) versehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Löcher einen Radius r im Bereich von 50 bis 2000 nm aufweisen und deren Anzahldichte über den Film (**3**, **23**, **24**, **25**, **32**, **43**) örtlich derart variiert, dass in Bereichen höherer äußerer magnetischer Feldstärke, erhöhter Temperatur oder auch erhöhter Stromdichte eine besonders hohe lokale Anzahldichte von Löchern (**4**, **44**) vorhanden ist.

2. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Anordnung entweder in unmittelbarer Umgebung des aktiven Bauteilbereichs (**49**; J1, J2, ..., J11) befindet oder der aktive Bauteilbereich (**49**; J1, J2, ..., J11) direkt in dem Film (**43**) ausgebildet ist.

3. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Film (**43**) in Form eines einen inneren Freibereich (**45**) umlaufenden und einen Josephson-Kontakt (**49**) enthaltenden Ringes ausgebildet ist.

4. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Freibereich (**45**) allseitig von den Löchern (**44**) umgeben ist.

5. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mittlere Abstand d zwischen benachbarten Löchern (**4**, **44**), der Lochradius r und die Dicke t des Films (**3**; **23**, **24**, **25**; **32**, **43**) so gewählt ist,

daß die Ungleichung

$B_{c1} \cdot (t/(d - 2r))^{0,5} \geq B$

erfüllt sind, wobei B_{c1} das untere kritische Feld des Supraleiters und B das äußere Magnetfeld bezeichnen.

6. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Radius r der Löcher (**4**, **44**) im Bereich von 500 bis 1000 nm liegt.

7. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mittlere Abstand d zwischen benachbarten Löchern (**4**, **44**) im Bereich von 2 bis 250 µm liegt.

8. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der mittlere Abstand d zwischen benachbarten Löchern (**4**, **44**) im Bereich von 5 bis 20 µm liegt.

9. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Hochtemperatursupraleiter aus einem $YBa_2Cu_3O_7$-Material gebildet ist.

10. Aktives Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das aktive Elektronikbauteil (**40**) einen SFQ- oder RSFQ-Logikschaltkreis enthält, dessen in Form von Josephson-Kontakten (J1, J2, ..., J11) realisierte elektronische Schaltelemente die durch Flußrauschen beaufschlagten aktiven Bauteilbereiche bilden.

11. Meßanordnung mit einem aktiven Elektronikbauteil (**40**) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Ansteuer- und Auswerteschaltung, die das aktive Elektronikbauteil (**40**) mit einer RF-Wechselspannung vorgegebener Frequenz betreibt und ein Signal ausgibt, das für eine Änderung des durch den Freiraum (**45**) hindurchtretenden magnetischen Flusses charakteristisch ist.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

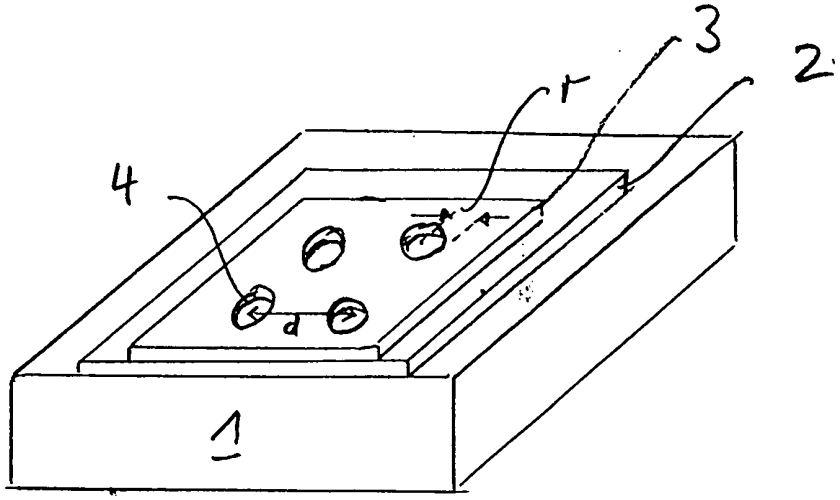


Fig. 1

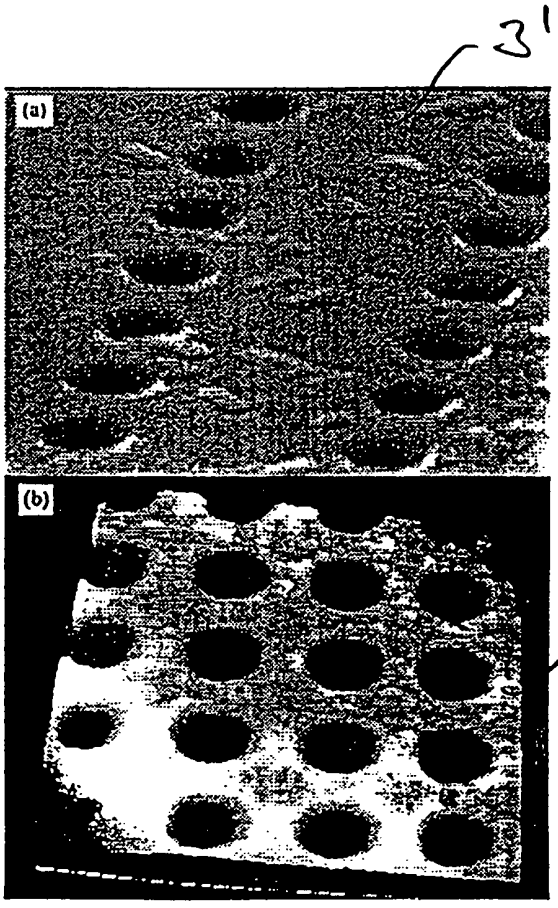


Fig. 2a

Fig. 2b

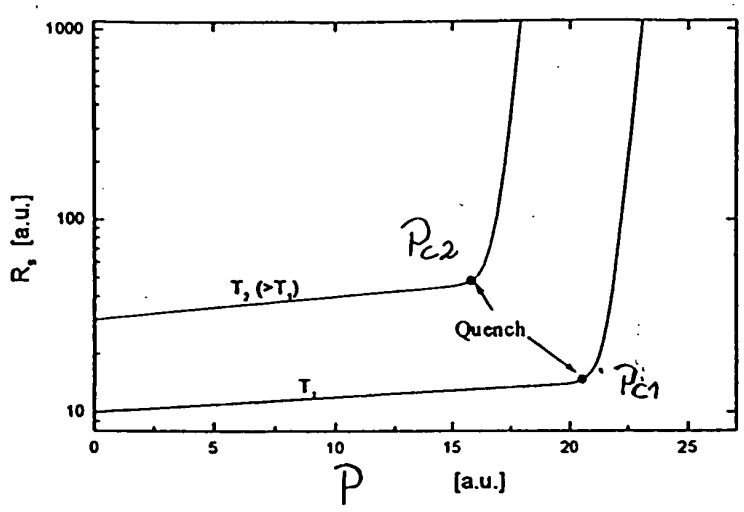


Fig.3

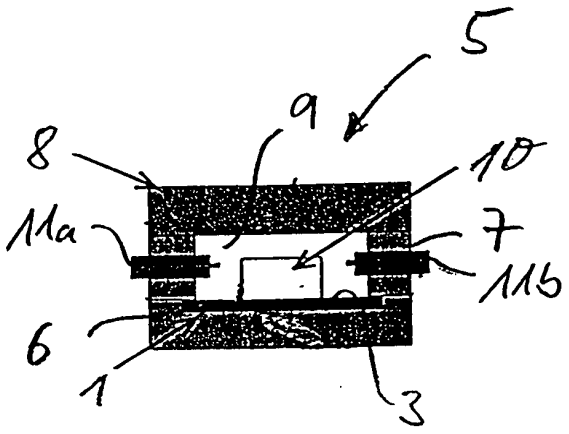


Fig.4a

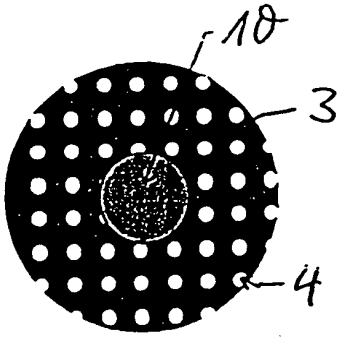


Fig.4b

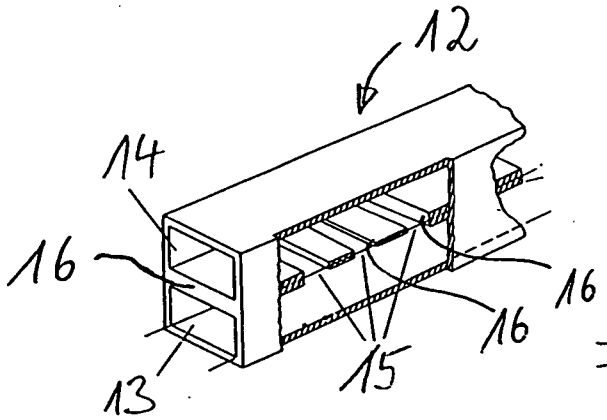


Fig. 5a

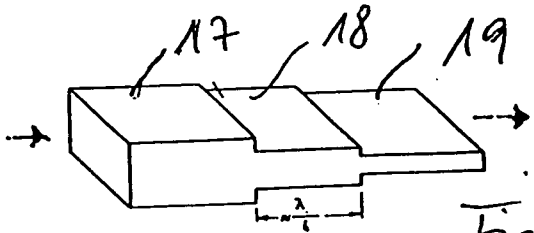


Fig. 5b

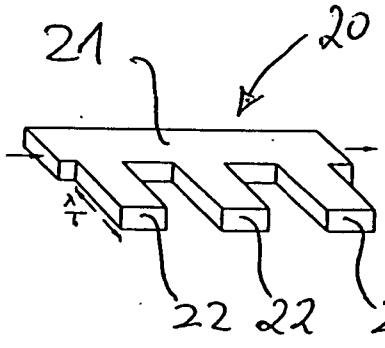


Fig. 5c

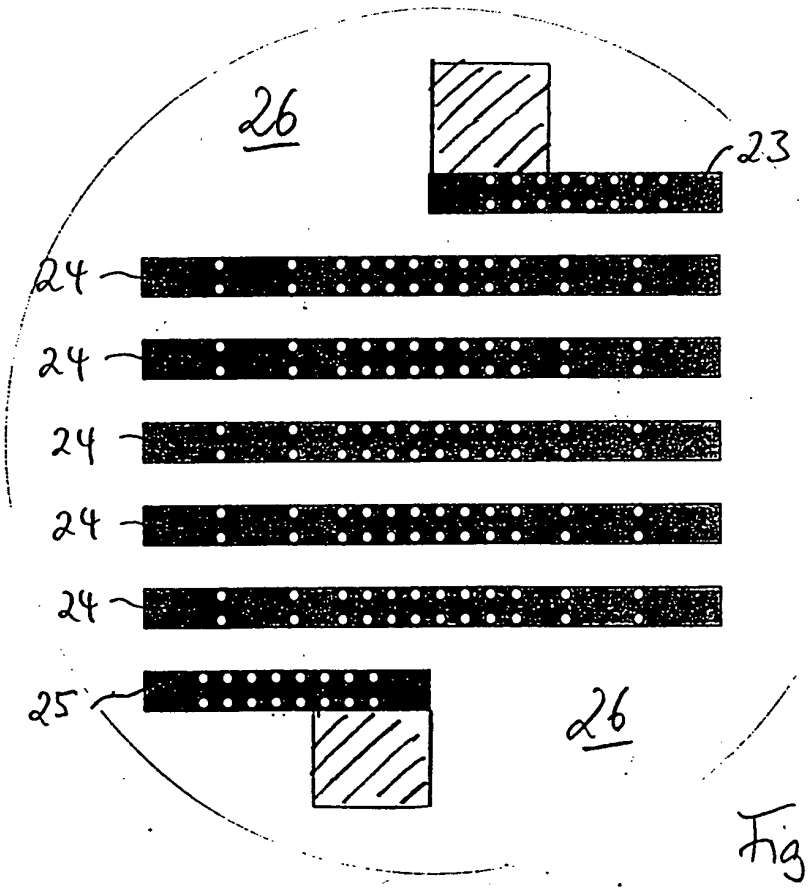


Fig. 6

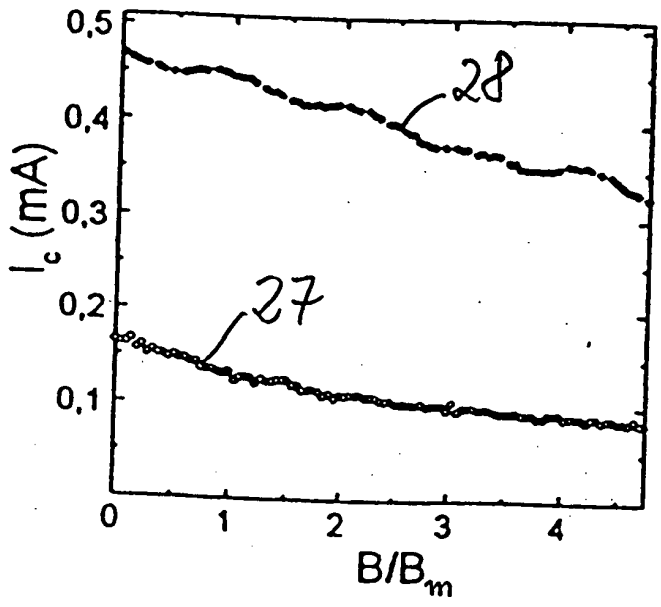


Fig. 7

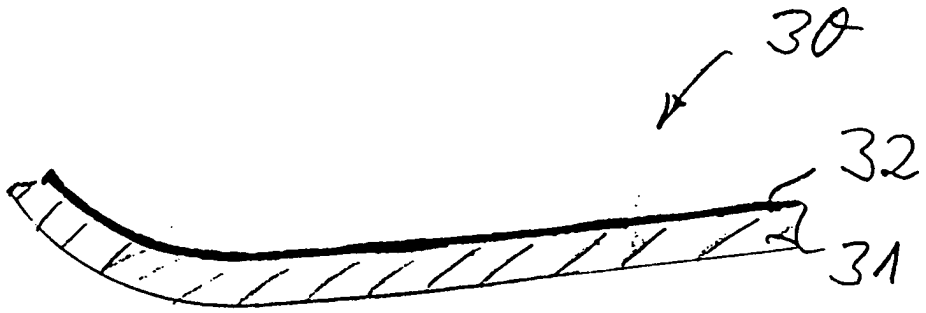


Fig. 8

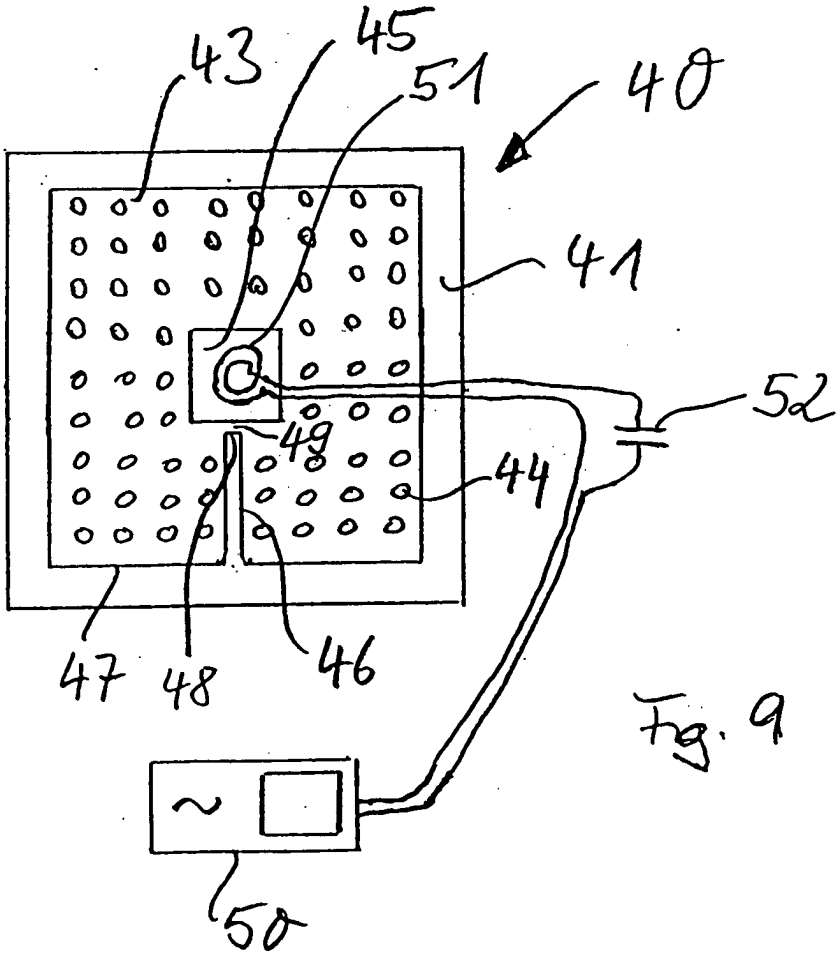


Fig. 9

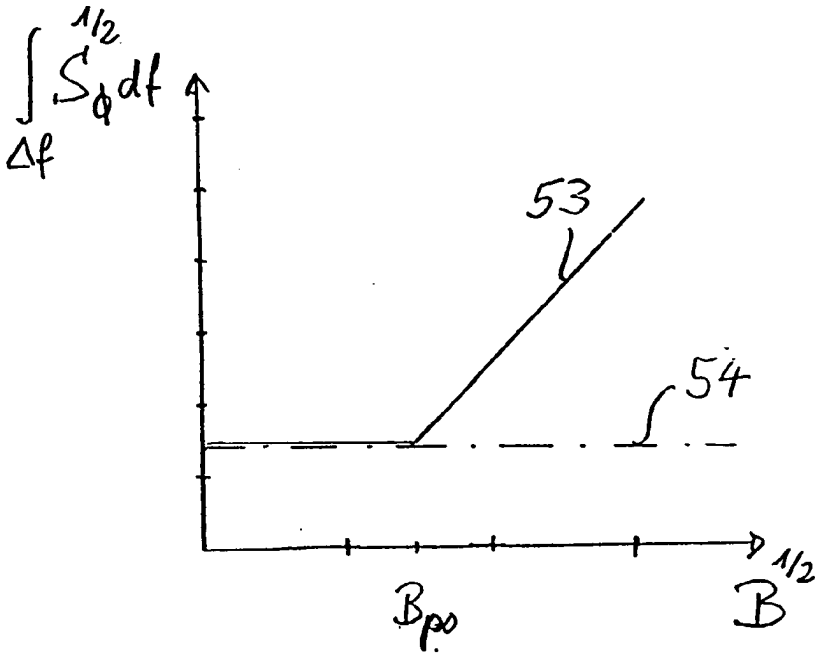

1/2
∫ Sφ df
Δf
53
54
1/2
B
Bp0

Fig. 10

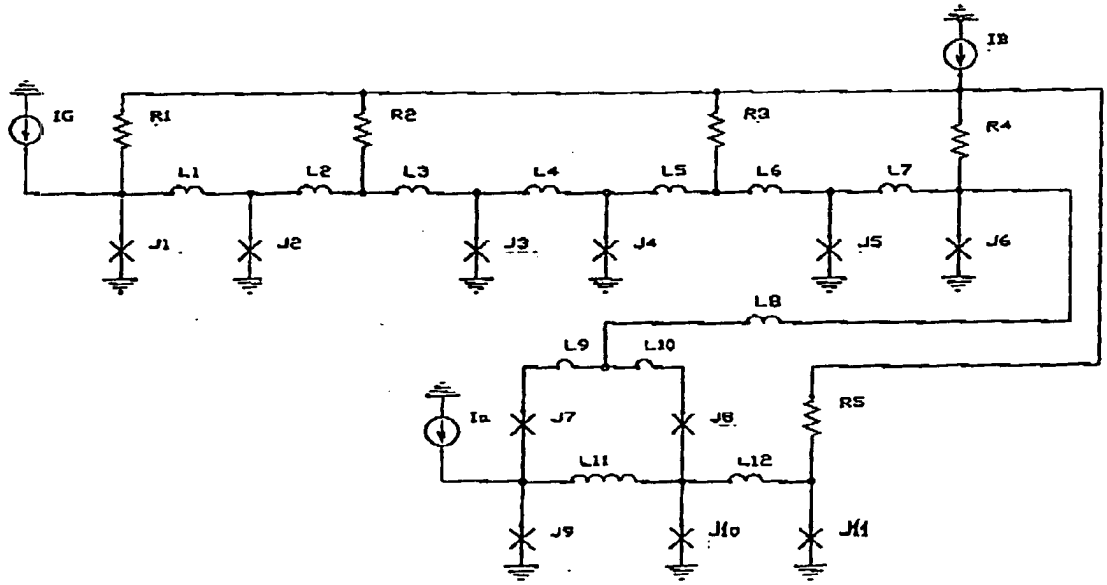

IB
IG
R1
R2
R3
R4
L1
L2
L3
L4
L5
L6
L7
J1
J2
J3
J4
J5
J6
L8
L9
L10
Ia
J7
J8
R5
L11
L12
J9
J10
J11

Fig. 11