



(12) **Patentschrift**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2012 005 382.6**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2012/073020**  
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2013/094253**  
(86) PCT-Anmeldetag: **10.09.2012**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **27.06.2013**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **28.08.2014**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **15.06.2023**

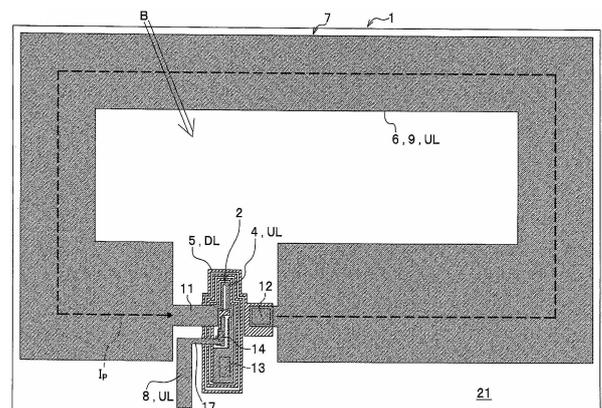
(51) Int Cl.: **G01R 33/035 (2006.01)**  
**H10N 60/12 (2023.01)**

Innerhalb von neun 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).

<p>(30) Unionspriorität: <b>2011-280040</b>                      <b>21.12.2011</b>      <b>JP</b></p> <p>(73) Patentinhaber: <b>SUPERCONDUCTING SENSOR TECHNOLOGY CORPORATION, Kanagawa, JP</b></p> <p>(74) Vertreter: <b>Reichert &amp; Lindner Partnerschaft Patentanwälte, 93049 Regensburg, DE</b></p> <p>(72) Erfinder: <b>Tsukamoto, Akira, c/o International Superconductivi, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, JP; Adachi, Seiji, c/o International</b></p>	<p><b>Superconductivi, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, JP; Oshikubo, Yasuo, c/o International Superconductivi, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, JP; Tanabe, Keiichi, c/o International Superconductivi, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, JP</b></p> <p>(56) Ermittelter Stand der Technik:</p> <table><tr><td><b>DE</b></td><td><b>195 05 060</b></td><td><b>C2</b></td></tr><tr><td><b>DE</b></td><td><b>198 16 218</b></td><td><b>A1</b></td></tr><tr><td><b>EP</b></td><td><b>0 327 123</b></td><td><b>B1</b></td></tr></table>	<b>DE</b>	<b>195 05 060</b>	<b>C2</b>	<b>DE</b>	<b>198 16 218</b>	<b>A1</b>	<b>EP</b>	<b>0 327 123</b>	<b>B1</b>
<b>DE</b>	<b>195 05 060</b>	<b>C2</b>								
<b>DE</b>	<b>198 16 218</b>	<b>A1</b>								
<b>EP</b>	<b>0 327 123</b>	<b>B1</b>								

(54) Bezeichnung: **Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor**

(57) Hauptanspruch: Ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) mit auf einem Substrat (21) ausgebildeten supraleitenden Lagen (DL, UL), wobei ein Supraleitendes-Quanten-Interferenz-Device (SQUID) (2) auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet ist, und wobei der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) umfasst: eine Sondenspule (6), welche auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet und mit einer Induktionsspule (4) des SQUID (2) verbunden ist; und eine Zuführungsspule (5), welche auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet, mit der Induktionsspule (4) des SQUID (2) und mit der Sondenspule (6) zu einer geschlossenen Schleife (7) verbunden und magnetisch mit der Induktionsspule (4) des SQUID (2) verbunden ist, wobei in ebener Ansicht zumindest eine Windung der Zuführungsspule (5) die Induktionsspule (4) des SQUID (2) umschließt oder von der Induktionsspule (4) des SQUID (2) umschlossen wird.



**Beschreibung**

## TECHNISCHES GEBIET

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft einen Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor mit einem Supraleitenden-Quanten-Interferenz-Device (SQUID).

## STAND DER TECHNIK

**[0002]** Ein SQUID ist als ein magnetischer Sensor bekannt, welcher ein magnetisches Signal mit höchster Empfindlichkeit detektieren kann, und ist verwendet worden zur Messung eines schwachen biomagnetischen Signals vom Gehirn, vom Herzen oder dergleichen, zur zerstörungsfreien Inspektion auf Grundlage des Restmagnetismus, oder zur Detektion von Wirbelströmen, und kürzlich in einer Magnetresonanztomographie mit sehr niedrigem magnetischen Feld und dergleichen. Jedoch ist ein SQUID aus einem Niedertemperatursupraleiter, welcher teures und schwer zu handhabendes flüssiges Helium zur Kühlung benötigt, in seiner Anwendungsbreite beschränkt. Seit der Entdeckung eines Hochtemperatursupraleiters, der supraleitende Eigenschaften bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs zeigt, ist die Entwicklung eines SQUID aus einem Hochtemperatursupraleiter, welcher bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs arbeitet, energisch vorangetrieben worden. Ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor mit einer Detektionsempfindlichkeit von 100 fT/Hz<sup>1/2</sup> oder darunter ist gegenwärtig käuflich erhältlich, und von einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor mit einer Detektionsempfindlichkeit von 10 fT/Hz<sup>1/2</sup> oder weniger wurde in der aktuellen Forschung und Entwicklung berichtet. Ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (SQUID aus einem Hochtemperatursupraleiter) erlaubt die Kühlung mit flüssigem Stickstoff, welcher kostengünstig und einfach zu handhaben ist, und daher wurden verschiedene Strukturen vorgeschlagen (siehe Nicht-Patent-Literatur 1 bis 8). Der SQUID aus einem Hochtemperatursupraleiter erlaubt die Kühlung mit flüssigem Stickstoff, der kostengünstig und einfach zu handhaben ist, und neue Anwendungen wie die zerstörungsfreie Inspektion sind vorgeschlagen worden.

## Literaturliste:

## Nicht-Patent-Literatur

Nicht-Patent-Literatur 1: Chapter 1 Introduction, „The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDS and SQUID Systems, Volume I“, Edited by John Clarke, Alex I. Braginski, ISBN: 978-3-527-40229-8

Nicht-Patent-Literatur 2: J. M. Jaycox und M. B. Ketchen, IEEE Trans Magn. MAG-17, (1981) 400-403

Nicht-Patent-Literatur 3: Drung D, Ludwig F, Muller W, Steinhoff U, Trahms L, Koch H, Shen Y Q, Jensen M B, Vase P, Holst T, Freltoft T, und Curio G, Appl. Phys. Lett, 68 (1996) 1421

Nicht-Patent-Literatur 4: Faley M I, Poppe U, Urban K, D N Paulson, und R L Fagaly, Journal of Physics: Conference Series 43 (2006) 1199-1202

Nicht-Patent-Literatur 5: Adachi S, Tsukamoto A, Oshikubo Y, Hato T, Ishimaru Y, und Tanabe K, IEEE Trans. Appl. Supercond, 21 (2011) 367-70

Nicht-Patent-Literatur 6: E. Dantsker, und S. Tanaka, J. Clarke, Appl. Phys. Lett. Vol.70 No.15 (1997) 2037-2039

Nicht-Patent-Literatur 7: K. Enpuku, K. Sueoka, K. Yoshida, und F. Irie, J. Appl. Phys, 57 (1985) 1691

Nicht-Patent-Literatur 8: Tsukamoto A, Saitoh K, Yokosawa K, Suzuki D, Seki Y, Kandori A, und Tsukada K, Physica C 426-431 (2005) 1580-84

Das deutsche Patent DE 195 05 060 C2 beschreibt eine magnetfeldempfindliche SQUID-Einrichtung aus Hochtemperatursupraleitermaterial mit einer ein Koppelloch bildenden SQUID-Schleife, mindestens einem Josephson-Element und einem Flusstransformator.

**[0003]** Die deutsche Offenlegungsschrift DE 198 16 218 A1 offenbart einen SQUID-Sensor mit geringer SQUID-Induktivität und starker magnetischer Kopplung mit einer integrierten Einkoppelspule mit großer Induktivität.

**[0004]** Das europäische Patent EP 0 327 123 B1 betrifft ein SQUID mit zwei durch eine Isolierschicht getrennten Lagen aus Hochtemperatursupraleitermaterial, wobei in einer der Lagen Hochtemperatursupraleitermaterial eine Modulationsspule und eine Eingangsspule ausgebildet sind.

## ÜBERSICHT DER ERFINDUNG

### Technisches Problem

**[0005]** SQUIDs umfassen einen RF-SQUID, welcher einen Josephson-Kontakt in seiner supraleitenden geschlossenen Schleife aufweist, und einen DC-SQUID, der zwei Josephson-Kontakte in seiner supraleitenden geschlossenen Schleife aufweist. Nicht-Patent-Literatur 1 schlägt eine Grundstruktur des DC-SQUID vor, und Nicht-Patent-Literatur 2 bis 8 beziehen sich ebenfalls auf den DC-SQUID. Der DC-SQUID stellt eine geschlossene Schleifenstruktur (supraleitende geschlossene Schleife) aus einer SQUID-Induktionsspule und zwei Josephson-Kontakten dar. Lässt man einen aufgeprägten Strom  $I_b$ , der etwas größer als ein kritischer Strom  $I_c$  ist, zwischen den Anschlüssen des SQUID fließen und erzeugt eine Spannung  $V$  in den beiden Josephson-Kontakten, so variiert die Spannung  $V$ , die zwischen den Anschlüssen erzeugt wird periodisch, mit dem Flussquant  $\Phi_0 (=2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb})$  als Periode, mit dem magnetischen Fluss  $\Phi$ , der die geschlossene Schleifenstruktur durchsetzt. Eine Rückkoppelung mittels eines flussverriegelten Schleifenkreises („flux locked loop circuit“, FLL Kreis) ermöglicht es, eine geringe Schwankung des Flusses wie etwa  $1/10^5$  bis  $1/10^6$  des Flussquants  $\Phi_0$  zu messen.

**[0006]** Ein SQUID verwendet eine größere Sondenspule, wenn er als hochempfindlicher magnetischer Sensor eingesetzt wird, da seine Breite gemeinhin nicht mehr als einige zehn bis einige hundert Mikrometer beträgt. Die Sondenspule bildet zusammen mit der Zuführspule einen magnetischen Flusswandler (geschlossene Schleifenstruktur) und benutzt die Zuführspule, die magnetisch mit dem SQUID gekoppelt ist. Wenn die Sondenspule einem magnetischen Feld  $B$  ausgesetzt wird, ändert sich ein die Sondenspule durchsetzender magnetischer Fluss. Ein Abschirmstrom  $I_p$ , welcher proportional zu einer Veränderung des durchsetzenden magnetischen Flusses ist, fließt durch die Sondenspule. Der Abschirmstrom  $I_p$  fließt durch die Zuführspule in der geschlossenen Schleifenstruktur, und ein magnetischer Fluss proportional zu dem Abschirmstrom  $I_p$  wird in dem mit der Zuführspule magnetisch gekoppelten SQUID erzeugt. Das heißt, eine Veränderung des magnetischen Flusses, welche durch eine Veränderung des magnetischen Feldes  $B$  erzeugt wird und die Sondenspule durchsetzt, wird von der Sondenspule zum SQUID übertragen. Setzt man eine Induktivität  $L_s$  für die Induktionsspule des SQUID voraus, eine Fläche  $A_p$  der Sondenspule, eine Induktivität  $L_p$  der Sondenspule, eine Induktivität  $L_i$  der Zuführspule, und eine wechselseitige Induktivität  $M$  zwischen dem SQUID und der Zuführspule, und unter Vernachlässigung der Induktivität von Leiterabschnitten zwischen der Zuführspule und der Sondenspule, so wird ein magnetischer Fluss  $\Phi_S$  durch den SQUID (Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor) detektiert, wenn für das äußere magnetische Feld  $B$ , dem die Sondenspule ausgesetzt wird, die Beziehung der Gleichung (1) gilt.

$$\Phi_S = I_p \cdot M = BA_p \cdot M / (L_p + L_i) = BA_p \cdot k(L_i \cdot L_s)^{1/2} / (L_p + L_i) \quad (1)$$

**[0007]** Hier gilt für die wechselseitige Induktivität  $M$  die Beziehung  $M = k(L_i \cdot L_s)^{1/2}$ , wobei kein Kopplungskoeffizient ( $0 < k < 1$ ) ist. Ein Verhältnis ( $\Phi_S / B$ ) des magnetischen Flusses  $\Phi_S$ , welcher vom SQUID detektiert wird, zu dem äußeren magnetischen Feld  $B$  wird als effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  bezeichnet, und genügt der Gleichung (2).

$$A_{\text{eff}} = \Phi_S / B = A_p \cdot M / (L_p + L_i) = A_p \cdot k(L_i \cdot L_s)^{1/2} / (L_p + L_i) \quad (2)$$

**[0008]** Ausgehend von der Gleichung (2) werden Bedingungen untersucht, unter denen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  anwächst, d.h. Bedingungen, unter denen eine Detektionsempfindlichkeit des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors erhöht wird. Die Induktivität  $L_s$  der Induktionsspule des SQUID wird gemeinhin auf einen Wert zwischen 40 und 100 pH gesetzt, da, falls dieser Wert zu hoch ist, eine Amplitude  $\Delta V$  der Modulationsspannung des SQUID klein wird, wodurch das Flussrauschen erhöht wird. Da außerdem die Sondenspule eine Größe und eine Form aufweist, welche von ihrer Verwendung abhängt, sind die Fläche  $A_p$  und die Induktivität  $L_p$  der Sondenspule Werte, die gesondert festgelegt werden. Daher sind zur Maximierung der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  anpassbare Parameter in Gleichung (2) der Kopplungskoeffizient  $k$  und die Induktivität  $L_i$  der Zuführspule. Ist die magnetische Kopplung zwischen der Zuführspule und dem SQUID perfekt, nimmt der Kopplungskoeffizient  $k$  seinen Maximalwert 1 an, und die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  wird ebenfalls maximal.

Ferner wird gemäß Gleichung (2) die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  maximal ( $A_{\text{eff}} = A_p(L_S/L_i)^{1/2/2}$ ), wenn die Induktivität  $L_i$  der Zuführspule gleich der Induktivität  $L_p$  der Sondenspule ist ( $L_i = L_p$ ).

**[0009]** Nicht-Patent-Literatur 2 schlägt einen SQUID des Ketchen-Typs vor, der eine ideale Struktur ist. Der SQUID des Ketchen-Typs weist eine Struktur auf, in welcher eine Zuführspule mit vielen Windungen über eine dünne Isolierschicht auf eine scheibenartige Induktionsspule eines SQUID gestapelt wird, was für den Kopplungskoeffizient  $k$  einen Wert nahe bei 1 ergibt. Darüber hinaus ist die Anzahl der Windungen der Zuführspule derart gewählt, dass die Induktivität  $L_p$  der Sondenspule und die Induktivität  $L_i$  der Zuführspule gleich sind ( $L_i = L_p$ ). Durch diese Konfiguration nähert sich die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  dem theoretischen Maximum an. Der SQUID des Ketchen-Typs wird auch als integrierter SQUID bezeichnet.

**[0010]** Als Niedertemperatursupraleiter-SQUID (LTS-SQUID) mit Niob (Nb) als Supraleiter wird generell der SQUID vom Ketchen-Typ benutzt. Als Hochtemperatursupraleiter-SQUID (HTS-SQUID), andererseits, ist ein direkt gekoppelter SQUID gebräuchlich, dessen Herstellung einfach ist, wie weiter unten ausgeführt. Dies deshalb, weil zur Produktion eines integrierten SQUIDs eine Technik zur Herstellung dünner Schichten mit vielen Lagen, darunter eine Vielzahl von Supraleiterlagen, erforderlich ist, aber für Hochtemperatursupraleiter eine Technik zur einfachen Herstellung einer zuverlässigen dünnen Schicht mit vielen Lagen noch nicht etabliert ist. Jedoch haben einige Forschungseinrichtungen, darunter eine Forschungseinrichtung der die Erfinder angehören, über einen Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor berichtet, der einen integrierten SQUID verwendet und eine Detektionsempfindlichkeit von  $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  oder darunter (siehe Nicht-Patent-Literatur 3 (Drung), Nicht-Patent-Literatur 4 (Faley), Nicht-Patent-Literatur 5 (Adachi)) hat.

**[0011]** Daher wird davon ausgegangen, dass ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor mit integriertem SQUID eine hohe Empfindlichkeit hat. Jedoch ist bekannt, dass, wenn der Sensor in einem magnetischen Feld wie dem Erdmagnetfeld abgekühlt wird, ein Phänomen auftritt, das als Einschluss des magnetischen Flusses bekannt ist, wodurch Rauschen verursacht wird. Bei dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor ist es erforderlich, dass der SQUID direkt in einer abschirmungslosen Umgebung ohne magnetische Abschirmung arbeitet. Wird ein integrierter SQUID im Erdmagnetfeld (abschirmungslose Umgebung) abgekühlt, wird magnetischer Fluss in den SQUID bildenden Supraleiter eingeschlossen (Einschluss des magnetischen Flusses). Der an einem Ort im Supraleiter eingeschlossene magnetische Fluss wird durch thermische Energie oder in manchen Fällen durch eine Veränderung eines äußeren magnetischen Felds an einen anderen Ort verlagert, und die Bewegung des magnetischen Flusses wird als eine Veränderung des magnetischen Felds auf den SQUID übertragen und verursacht dadurch Rauschen. Insbesondere wenn der magnetische Fluss in dem Supraleiter der SQUID-Induktionsspule eingeschlossen ist, wird eine Veränderung des magnetischen Flusses direkt auf den SQUID übertragen und verursacht dadurch höheres Rauschen und macht es unmöglich, die ursprüngliche hohe Empfindlichkeit aufrecht zu erhalten. Ein solcher Einschluss des magnetischen Flusses erfolgt nicht nur bei Abkühlung im magnetischen Feld, sondern auch dann, wenn ein starkes magnetisches Feld oder ein magnetisches Feld, das mit einer abrupten Veränderung des magnetischen Feldes einhergeht, angewendet wird.

**[0012]** Wird eine supraleitende dünne Schicht der Breite  $w$  in einem magnetischen Feld, welches senkrecht zu der dünnen Schicht steht, abgekühlt, so ist das maximale magnetische Feld (Schwellwert-Magnetfeld)  $B_{\text{th}}$ , in welchem der Supraleiter den Fluss des magnetischen Feldes nach außen drängen kann, durch die Formel von Clem, Gleichung (3), gegeben (Nicht-Patent-Literatur 6).

$$B_{\text{th}} = \pi \Phi_0 / 4w^2 \quad (3)$$

**[0013]** Diese Gleichung (3) besagt, dass im Falle des geomagnetischen Feldes von beispielsweise  $50 \mu\text{T}$ , die supraleitende dünne Schicht den Fluss nach außen drängen kann, wenn die Breite  $w$  der supraleitenden dünnen Schicht  $5,7 \mu\text{m}$  oder darunter ist, aber der Einschluss des magnetischen Flusses auftritt, wenn die Breite  $w$   $5,7 \mu\text{m}$  überschreitet. Bei einem integrierten SQUID ist eine Zuführspule mit vielen Windungen auf eine SQUID-Induktionsspule gestapelt, und demgemäß wird der SQUID zu einer Art breiten Scheibe, und seine Breite beträgt Hunderte von Mikrometern. Aus diesem Grund tritt der Einschluss des magnetischen Flusses in der Induktionsspule des integrierten SQUID leicht auf.

**[0014]** Um dem zu begegnen, schlägt Nicht-Patent-Literatur 1 vor, eine scheibenartige SQUID-Induktionsspule aus einem Hochtemperatursupraleiter als eine Netzstruktur mit einer Linienbreite von  $4 \mu\text{m}$  zu bilden, oder eine Schlitzstruktur mit einer Linienbreite von  $4 \mu\text{m}$ . Es wird berichtet, dass die vorstehende Konfiguration das Auftreten des Einschlusses des magnetischen Flusses in der scheibenartigen SQUID-Induktionsspule verhindern kann. Da jedoch die Oberfläche der scheibenartigen SQUID-Induktionsspule mit Netzstruk-

tur oder Schlitzstruktur nicht flach ist, sondern von konkav-konvexer Form, ist es technisch schwierig, eine Zuführungspule mit vielen Windungen auf der konkavkonvexen Form auszubilden, und bis heute wurde von einem Ketchen-Typ SQUID mit einer solchen Struktur nicht berichtet. Der Ketchen-Typ SQUID kann einen hohen Kopplungskoeffizienten  $k$  nahe 1 erzielen und ist hochempfindlich, aber in der Anwendung, die eine Abkühlung im Erdmagnetfeld erfordert, tritt leicht der Einschluss des magnetischen Flusses auf, und die Unterdrückung des Einschlusses des magnetischen Flusses ist schwierig. Ferner, da die Zuführungspule mit vielen Windungen auf die scheibenartige SQUID-Induktionsspule gestapelt wird, entsteht eine große Kapazität zwischen der Zuführungspule und der SQUID-Induktionsspule. Daher entsteht ein Problem, weil eine LC Resonanz erzeugt wird und die SQUID-Eigenschaften verschlechtert (siehe Nicht-Patent-Literatur 7). Es ist bekannt, einen Dämpfungswiderstand vorzusehen, aber es wurde kaum je versucht, insbesondere nicht bei einem Magnetsensor aus einem Hochtemperatursupraleiter, für welchen noch keine Produktionstechnologie etabliert ist, da die Produktionsschritte kompliziert sind.

**[0015]** Gemeinhin ist in einem Magnetsensor aus einem Niedertemperatursupraleiter eine Sondenspule aus einem Draht eines Supraleiters wie Niob (Nb) geformt und ist supraleitend mit einer Zuführungspule, welche zusammen mit einem SQUID auf einem Substrat gefertigt ist, verbunden. Dementsprechend ist es durch magnetische Abschirmung des Substrats möglich, den SQUID abzuschirmen ohne die Sondenspule abzuschirmen. Selbst in einem starken Magnetfeld oder einem Magnetfeld, welches eine abrupte Veränderung des magnetischen Feldes begleitet, tritt kein Einschluss des magnetischen Flusses auf, da das magnetische Feld nicht auf den SQUID als solchen wirkt. In einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor sind jedoch ein SQUID und eine Sondenspule auf dem gleichen Substrat gefertigt, um die supraleitende Verbindung wegzulassen, da eine Technologie für supraleitende Verbindungen für Hochtemperatursupraleiter noch nicht etabliert wurde. Es ist schwierig, lediglich den SQUID magnetisch abzuschirmen, ohne die Sondenspule auf dem gleichen Substrat abzuschirmen.

**[0016]** Als ein SQUID von anderer Struktur als dem Ketchen-Typ wird ein direkt gekoppelter SQUID vorgeschlagen, bei dem eine Sondenspule und eine SQUID-Induktionsspule in Reihe geschaltet sind (Nicht-Patent-Literatur 8). Bei dem direkt gekoppelten SQUID ist es möglich, SQUIDs mit einer einlagigen dünnen Supraleiterschicht herzustellen. Ein Josephson-Kontakt benutzt einen Korngrenzenkontakt wie etwa einen bikristallinen Kontakt oder einen Stufenkantenkontakt, welche mit einer einlagigen dünnen Supraleiterschicht ausgebildet werden können. Bei dem direkt gekoppelten SQUID ist eine Sondenspule direkt mit einer SQUID-Induktionsspule vom Schlitz-Loch-Typ verbunden, und die SQUID-Induktionsspule erfüllt auch die Funktion der Zuführungspule, welche weggelassen ist. Genauer fließt ein Abschirmstrom  $I_p$ , der durch einen magnetischen Fluss, welcher die Sondenspule durchsetzt, induziert wird, direkt durch die SQUID-Induktionsspule. Der direkt-gekoppelte SQUID hat eine Stromkopplungsstruktur, bei welcher die Zuführungspule, durch welche der Abschirmstrom  $I_p$  fließt, nicht magnetisch mit der SQUID-Induktionsspule gekoppelt ist, aber der Abschirmstrom  $I_p$  direkt durch die SQUID-Induktionsspule fließt. Der direkt gekoppelte SQUID kann aus einer einlagigen dünnen Supraleiterschicht hergestellt werden, ohne die Notwendigkeit, eine Zuführungspule auf der SQUID-Induktionsspule anzubringen. Aus diesem Grund ist der direkt gekoppelte SQUID vorwiegend in Gebrauch bei Hochtemperatursupraleitern, für welche eine Technik zur einfachen Herstellung einer zuverlässigen dünnen Schicht aus vielen Lagen noch nicht etabliert ist. Ferner, da beim direkt gekoppelten SQUID keine Notwendigkeit besteht, eine Zuführungspule auf die SQUID-Induktionsspule aufzubringen, besteht die Möglichkeit, eine Linienbreite der SQUID-Induktionsspule zu reduzieren und das Auftreten des Einschlusses des magnetischen Flusses zu unterdrücken, indem die SQUID-Induktionsspule mit einer Breite von  $5 \mu\text{m}$  oder darunter gefertigt wird, selbst wenn der SQUID im Erdmagnetfeld abgekühlt wird.

**[0017]** Jedoch ist der direkt gekoppelte SQUID dem integrierten SQUID hinsichtlich der Empfindlichkeit unterlegen. Was den direkt gekoppelten SQUID anbelangt, da die SQUID-Induktionsspule auch als Zuführungspule fungiert, ist die Induktivität  $L_i$  der Zuführungspule gleich der Induktivität  $L_s$  der SQUID-Induktionsspule ( $L_i = L_s$ ), und beträgt ungefähr 40 bis 100 pH. Da die Induktivität  $L_p$  der Sondenspule einen Wert von einigen Nanohenry bis zu einigen zehn Nanohenry hat, stimmt sie kaum mit der Induktivität  $L_s$  der SQUID-Induktionsspule ( $L_p \gg L_s$ ) überein. Die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  kann in diesem Fall wie in Formel (4) genähert werden, in Anbetracht von  $L_p \gg L_s$ . In diesem Fall wird die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  (Kopplungskoeffizient zwischen der Sondenspule und dem SQUID) kleiner als die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $=A_p(L_s/L_i)^{1/2}/2$ ) in der Nicht-Patent-Literatur 2. Gemeinhin beträgt die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des direkt gekoppelten SQUID ein Fünftel bis ein Zehntel derjenigen des integrierten SQUID.

$$A_{\text{eff}} = A_p \cdot L_s / L_p \quad (4)$$

**[0018]** Wie oben beschrieben, der SQUID vom Ketchen-Typ ist hochempfindlich, aber der Einschluss magnetischen Flusses tritt leicht auf, und der direkt gekoppelte SQUID hat eine niedrige Empfindlichkeit, aber der Einschluss magnetischen Flusses tritt nicht leicht auf.

**[0019]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung einen Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor bereitzustellen, der eine hohe Empfindlichkeit aufweist, und in dem der Einschluss magnetischen Flusses nicht leicht auftritt.

#### Lösung der Aufgabe

**[0020]** Zur Lösung der obigen Aufgabe stellt die vorliegende Erfindung einen Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor bereit, welcher auf einem Substrat ausgebildete supraleitende Lagen aufweist, wobei auf den supraleitenden Lagen ein Supraleitendes-Quanteninterferenz-Device (SQUID) ausgebildet ist, wobei der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor umfasst: eine Sondenspule, die auf den supraleitenden Lagen ausgebildet und mit einer Induktionsspule des SQUID verbunden ist; und einer Zuführungsspule, die auf den supraleitenden Lagen ausgebildet, mit der Induktionsspule des SQUID und der Sondenspule zu einer geschlossenen Schleife verbunden und magnetisch mit der Induktionsspule des SQUID gekoppelt ist, wobei, in ebener Ansicht, zumindest eine Windung der Zuführungsspule die Induktionsspule des SQUID umschließt, oder von der Induktionsspule des SQUID umschlossen wird.

#### Vorteilhafte Wirkungen der Erfindung

**[0021]** Gemäß der vorliegenden Erfindung kann ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor bereitgestellt werden, in dem der Einschluss des magnetischen Flusses nicht leicht auftritt.

#### Figurenliste

**Fig. 1A** ist eine ebene Ansicht eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 1B** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs eines Supraleitenden-Quanteninterferenz-Devices (SQUID) 2 in **Fig. 1A**.

**Fig. 1C** ist ein Schaltdiagramm des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 2A** ist eine ebene Ansicht eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 2B** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs der SQUIDs 2a, 2c in **Fig. 2A**.

**Fig. 2C** ist ein Schaltbild des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 3A** bis **Fig. 3D** sind Querschnittsansichten im Prozess der Herstellung des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, wobei **Fig. 3A** eine Querschnittsansicht bei einem ersten Prozessschritt ist, **Fig. 3B** eine Querschnittsansicht bei einem zweiten Prozessschritt ist,

**Fig. 3C** eine Querschnittsansicht bei einem dritten Prozessschritt ist, und **Fig. 3D** eine Querschnittsansicht bei einem vierten Prozessschritt ist.

**Fig. 4A** ist ein Diagramm, welches eine Beziehung zwischen der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  in den SQUIDs 2a, 2c, die in dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung vorgesehen sind, und der Anzahl der Windungen der Zuführungsspule darstellt.

**Fig. 4B** ist ein Diagramm, welches eine Beziehung zwischen dem Verhältnis der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2a (SQUID 1) zu der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c (SQUID 2), die in dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung vorgesehen sind, und der Anzahl der Windungen der Zuführungsspule darstellt.

**Fig. 5** ist ein Diagramm, welches die Rauschcharakteristik des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt.

**Fig. 6A** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 6B** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 7** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 8** ist eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemäß einer sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

#### Beschreibung der Ausführungsformen

**[0022]** Im Folgenden werden Ausführungsformen der Erfindung im Detail mit Verweis auf die Zeichnungen beschrieben.

#### (Erste Ausführungsform)

**[0023]** **Fig. 1A** zeigt eine ebene Ansicht eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 umfasst ein Substrat 21, und auf dem Substrat 21 ausgebildete zweilagige supraleitende Lagen, bei welchen es sich um eine untere supraleitende Lage (erste supraleitende Lage) DL und eine obere supraleitende Lage (zweite supraleitende Lage) UL handelt. In der **Fig. 1A** wird die untere supraleitende Lage DL durch diagonal schraffierte Bereiche und die obere supraleitende Lage UL durch gepunktete (graue) Bereiche dargestellt. Ein Supraleitendes-Quanteninterferenz-Device (SQUID) 2, eine Zuführspule 5, eine Sondenspule 6 und eine Elektrode 8 sind auf der unteren supraleitenden Lage DL und der oberen supraleitenden Lage UL ausgebildet. Die Zuführspule 5 ist auf der unteren supraleitenden Lage DL ausgebildet, und eine Induktionsspule 4 eines SQUID, welche Teil des SQUID 2 ist, die Sondenspule 6 und die Elektrode 8 sind auf der oberen supraleitenden Lage UL ausgebildet.

**[0024]** Die Sondenspule 6 ist eine Spule mit einer Windung und ist entlang eines äußeren Umfangs des Substrats 21 vorgesehen. Dadurch wird eine ein Magnetfeld erfassende Fläche für ein äußeres Magnetfeld B so groß wie möglich. Ein Ende der Sondenspule 6 ist mit einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4 über eine Verdrahtung 11 verbunden, welche auf der oberen supraleitenden Lage UL ausgebildet ist. Ein anderes Ende der SQUID-Induktionsspule 4 ist mit einem Ende der Zuführspule 5 über einen supraleitenden Kontakt (Bereich) 13 verbunden, welcher die untere supraleitende Lage DL mit der oberen supraleitenden Lage UL verbindet. Die Zuführspule 5 ist eine Spule mit mehreren Windungen, in der Darstellung der **Fig. 1A** mit 3 Windungen. In ebener Ansicht ist die Zuführspule 5 nahe der Außenseite des SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) angeordnet, und der SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) ist nahe der Innenseite der Zuführspule 5 angeordnet. In ebener Ansicht umschließt jede Windung der Zuführspule 5 den SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4). Ferner ist in ebener Ansicht der supraleitende Kontakt(Bereich) 13 innerhalb der Wicklung (Windungen) der Zuführspule 5 und außerhalb des SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) vorgesehen. Ein anderes Ende der Zuführspule 5 ist mit einem anderen Ende der Sondenspule 6 über einen supraleitenden Kontakt (Bereich) 12 verbunden, der die untere supraleitende Lage DL mit der oberen supraleitenden Lage UL verbindet.

**[0025]** Genauer sind bei dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 die Sondenspule 6, die SQUID-Induktionsspule 4 (SQUID 2) und die Zuführspule 5 so in Reihe geschaltet, dass sie eine geschlossene Schleife 7 bilden. Aufgrund dieser Anordnung fließt der Abschirmstrom  $I_p$ , welcher durch das externe Magnetfeld B in der Sondenspule 6 erzeugt wird und durch diese fließt, direkt durch die SQUID-Induktionsspule 4 und kann stromgekoppelt werden, auf die gleiche Weise wie beim direkt gekoppelten SQUID. Ferner fließt der Abschirmstrom  $I_p$ , welcher aufgrund des äußeren Magnetfeldes B durch die Sondenspule 6 fließt, direkt durch die Zuführspule 5 um in der Zuführspule 5 ein magnetisches Feld zu erzeugen, welches proportional zu dem äußeren Magnetfeld B ist, in der gleichen Weise wie bei einem SQUID vom Ketchen-Typ. Die Sondenspule 6 und die Zuführspule 5 wirken als magnetischer Flusswandler. Da jede Windung der Zuführspule 5 den SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) umschließt, ist die Zuführspule 5 magnetisch mit dem SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) gekoppelt. Das in der Zuführspule 5 erzeugte Magnetfeld, welches proportional zum äußeren Magnetfeld B ist, wirkt auf den SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4). Im Ergebnis kann der Kopplungskoeffizient k deutlich weiter verbessert werden als im direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik.

**[0026]** Andererseits kann, da die Windungen der Zuführspule 5 nicht auf die SQUID-Induktionsspule 4 gestapelt sind, die kapazitive Komponente zwischen der Zuführspule 5 und der SQUID-Induktionsspule 4

stärker unterdrückt werden als im SQUID vom Ketchen-Typ gemäß dem Stand der Technik. Auf diese Weise ist es möglich, eine Erzeugung von LC-Resonanz zu unterdrücken.

**[0027]** Man beachte, dass die Sondenspule 6 auch als eine Elektrode 9 fungiert. Die Messung des magnetischen Feldes  $B$  mit dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 beinhaltet den Fluss eines aufgeprägten Stroms zwischen der Elektrode 9 (Sondenspule 6) und der Elektrode 8, und die Messung einer dazwischen vorliegenden Spannung. Die Sondenspule 6 ist im Vergleich mit der Elektrode 8 groß, und ein externer Anschluss kann leicht mit der Sondenspule 6 verbunden werden, welche als die Elektrode 9 verwendet werden kann. Die Elektrode 9 ist über eine Verdrahtung 11 mit der oberen supraleitenden Lage UL (SQUID-Induktionsspule 4) des SQUID 2 verbunden. Ferner ist die Elektrode 8 über einen supraleitenden Kontakt(bereich) 14, der die untere supraleitende Lage DL mit der oberen supraleitenden Lage UL verbindet, mit der unteren supraleitenden Lage DL des SQUID 2 verbunden. In ebener Ansicht ist der supraleitende Kontakt(bereich) 14 innerhalb der Wicklung (Windungen) der Zuführspule 5 und außerhalb des SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) vorgesehen.

**[0028]** Fig. 1B zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in Fig. 1A. Der SQUID 2 beinhaltet zwei Josephson-Kontakte 3a, 3b und die SQUID-Induktionsspule 4. Die beiden Josephson-Kontakte 3a, 3b und die SQUID-Induktionsspule 4 sind in Reihe geschaltet, und der SQUID 2 weist die Struktur einer geschlossenen Schleife auf. In der Darstellung der Fig. 1B sind die Josephson-Kontakte 3a, 3b als Josephson-Kontakte vom Rampenflanken-Typ (ramp-edge type) beschrieben.

**[0029]** Die Josephson-Kontakte 3a, 3b haben eine zweilagige Struktur, in welcher die obere supraleitende Lage UL auf die Rampenflanke der unteren supraleitenden Lage DL deponiert wird. Mit den Positionen der beiden Josephson-Kontakte 3a, 3b als Begrenzung, bildet ein Teil die untere supraleitende Lage DL und der andere Teil die obere supraleitende Lage UL. Ein unterer supraleitender Bereich DL1 ist seitlich der unteren supraleitenden Lage DL vorgesehen, welche ein Teil der beiden Josephson-Kontakte 3a, 3b ist. Der untere supraleitende Bereich DL1 ist mit einer Verdrahtung 17 der oberen supraleitenden Lage UL verbunden, in dem supraleitenden Kontakt(bereich) 14 innerhalb der Zuführspule 5. Die Verdrahtung 17 übergreift die Zuführspule 5 und ist mit der Elektrode 8 der oberen supraleitenden Lage UL außerhalb der Zuführspule 5 verbunden.

**[0030]** Die SQUID-Induktionsspule 4 ist mit der oberen supraleitenden Lage UL verbunden, welche den anderen Teil der beiden Josephson-Kontakte 3a, 3b bildet. Die SQUID-Induktionsspule 4 ist vom Schlitz-Loch-Typ, und die den magnetischen Fluss einschließende Fläche  $S$  des SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) ist schlitzförmig (rechteckig) mit einem großen Horizontal-zu-vertikal-Verhältnis. Die SQUID-Induktionsspule 4 kann als Spule mit einer Windung aufgefasst werden. Eine Linienbreite  $W2$  der SQUID-Induktionsspule 4 und eine Linienbreite  $W3$  der Zuführspule 5 (51, 52, 53) sind einander beinahe gleich ( $W2=W3$ ). Dies macht es möglich, einen elektrischen Strom der gleichen Größenordnung durch die SQUID-Induktionsspule 4 und die Zuführspule 5 (51, 52, 53) zu treiben. Die SQUID-Induktionsspule 4 und die Zuführspule 5 (51, 52, 53) sind in Reihe geschaltet, durch welche ein Abschirmstrom  $I_p$ , welcher ein elektrischer Strom derselben Größenordnung ist, fließt.

**[0031]** Ferner beträgt die Linienbreite  $W2$  der SQUID-Induktionsspule 4  $5 \mu\text{m}$  oder darunter. Die Linienbreite  $W2$  der SQUID-Induktionsspule 4 ist nicht breit wie diejenige der scheibenartigen SQUID-Induktionsspule im SQUID vom Ketchen-Typ des Stands der Technik, sondern ist schmal ausgebildet wie bei einer Schlitz-Loch-Typ SQUID-Induktionsspule des direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik. Deshalb tritt, wie bei der SQUID-Induktionsspule 4, kein Einschluss des magnetischen Flusses auf, selbst wenn im Erdmagnetfeld abgekühlt wird, und es ist eine hochempfindliche Messung möglich, sogar in einer nicht abgeschirmten Umgebung wie im Erdmagnetfeld.

**[0032]** Ferner ist eine Breite  $W1$  der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$  des SQUID 2 in einer Anordnungsrichtung, in welcher ein Paar von Josephson-Kontakten 3a, 3b angeordnet sind, ungefähr gleich zu einem Abstand  $d$  zwischen dem Paar der Josephson-Kontakte 3a, 3b ( $W1=d$ ). Dies ermöglicht es, den SQUID 2 wie einen Schlitz-Loch-Typ-SQUID, wie er beim direkt gekoppelten SQUID eingesetzt wird, zu verwenden.

**[0033]** Eine Verdrahtung 11 ist mit einem Verbindungsteil zwischen einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4 und dem Josephson-Kontakt 3a verbunden. Die Verdrahtung 11 übergreift die Zuführspule 5 und ist mit einem Ende der Sondenspule 6 außerhalb der Zuführspule 5 verbunden. Ein oberer supraleitender Bereich UL1 ist mit einem Verbindungsteil zwischen einem anderen Ende der SQUID-Induktionsspule 4 und dem

Josephson-Kontakt 3b verbunden. Der obere supraleitende Bereich UL1 ist mit der innersten umschließenden Windung 51 der Zuführspule 5 auf der unteren supraleitenden Lage DL verbunden, im supraleitenden Kontakt(bereich) 13. Die Windung 53, welche die dritte von innen und auf dem äußersten Umfang der Zuführspule 5 gelegen ist, ist mit einem Ende (einem anderen Ende) der Sondenspule 6 verbunden, in dem supraleitenden Kontakt(bereich) 12. Ein Ende der Sondenspule 6 ist direkt mit einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4, und ein anderes Ende der Sondenspule 6 ist über die Zuführspule 5 mit einem anderen Ende der SQUID-Induktionsspule 4 verbunden.

**[0034] Fig. 1C** zeigt ein Schaltbild eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Wie oben beschrieben sind im Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 die Sondenspule 6, die SQUID-Induktionsspule 4 (SQUID 2) und die Zuführspule 5 in Reihe geschaltet, so dass sie eine geschlossene Schleife 7 bilden. Mit einer Induktivität  $L_S$  der SQUID-Induktionsspule, einer Fläche  $A_p$  der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche der Sondenspule 6, einer Induktivität  $L_p$  der Sondenspule 6, einer Induktivität  $L_{2i}$  der Zuführspule 5, und einer wechselseitigen Induktivität  $M_2$  zwischen der SQUID-Induktionsspule 4 und der Zuführspule 5, gilt für einen magnetischen Fluss  $\Phi_S$ , detektiert vom SQUID 2, wenn das äußere Magnetfeld  $B$  auf die Sondenspule 6 wirkt, die Beziehung der Gleichung (5).

$$\Phi_S = I_p \cdot (L_S + M_2) = BA_p \cdot (L_S + M_2) / (L_p + L_S + L_{2i}) \quad (5)$$

**[0035]** Dabei ist  $I_p$  ein Abschirmstrom, welcher durch den magnetischen Flusswandler 7 (Sondenspule 6) fließt, und die wechselseitige Induktivität  $M_2$  genügt der Gleichung  $M_2 = k(L_{2i} \cdot L_S)^{1/2}$ , wobei kein Kopplungskoeffizient ( $0 < k < 1$ ) ist. Die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ , welche ein Verhältnis des durch den SQUID 2 detektierten magnetischen Flusses  $\Phi_S$  zu dem äußeren Magnetfeld  $B$  ist, genügt der Beziehung der Gleichung (6).

$$A_{\text{eff}} = \Phi_S / B = A_p \cdot (L_S + M_2) / (L_p + L_S + L_{2i}) = A_p \cdot L_S \cdot \left(1 + k(L_{2i}/L_S)^{1/2}\right) / (L_p + L_S + L_{2i}) \quad (6)$$

(Zweite Ausführungsform)

**[0036] Fig. 2A** zeigt eine ebene Ansicht eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. In dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 sind drei SQUIDs 2a, 2b, 2c und zwei Zuführspulen 5a, 5b mit einer Sondenspule 6 in Reihe geschaltet. Es wird erwartet, dass der SQUID 2c, der sich in der Mitte befindet, in der Lage ist, mit der gleichen Empfindlichkeit zu messen wie der in dem direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik. Die SQUIDs 2a, 2b, welche sich auf der linken und rechten Seite befinden, ermöglichen es, das magnetische Feld  $B$  mit hoher Empfindlichkeit zu messen, auf die gleiche Weise wie der SQUID 2 gemäß der ersten Ausführungsform, da die Zuführspulen 5a, 5b um die jeweiligen direkt gekoppelten SQUIDs herum angeordnet sind. Da die drei SQUIDs 2a, 2b, 2c gleichzeitig hergestellt werden können, kann der SQUID 2c als Referenz für einen Vergleich mit den SQUIDs 2a und 2b benutzt werden. Man beachte, dass, wenn der Vergleich nicht erforderlich ist, der SQUID 2c weggelassen werden kann. Was die beiden SQUIDs 2a, 2b anbelangt, so ist es möglich, einen zu verwenden, der abhängig von der angedachten Verwendung höherwertige Eigenschaften hat, und es ist lediglich erforderlich, dass irgendeiner davon einen Test bei der Produktinspektion besteht. Daher kann der Produktausstoß des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gesteigert werden. Man beachte, dass die Messung des magnetischen Feldes  $B$  umfasst: bei Verwendung des SQUID 2a, einen aufgeprägten Strom zwischen der Elektrode 9 (Sondenspule 6) und der Elektrode 8a zu treiben und eine Spannung dazwischen zu messen; wenn der SQUID 2b benutzt wird, einen aufgeprägten Strom zwischen der Elektrode 9 und der Elektrode 8b zu treiben und eine Spannung dazwischen zu messen; und wenn der SQUID 2c benutzt wird, einen aufgeprägten Strom zwischen der Elektrode 9 und der Elektrode 8c zu treiben und eine Spannung dazwischen zu messen.

**[0037]** Die Konfiguration aus der Sondenspule 6, dem SQUID 2a, der Zuführspule 5a und der Elektrode 8a ist die gleiche wie die Konfiguration aus der Sondenspule 6, dem SQUID 2, der Zuführspule 5 und der Elektrode 8 im Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der ersten Ausführungsform. In der ersten Ausführungsform kann nämlich der SQUID 2 als SQUID 2a, die Zuführspule 5 als Zuführspule 5a und die Elektrode 8 als Elektrode 8a aufgefasst werden.

**[0038]** Ferner sind die Konfiguration aus der Sondenspule 6, dem SQUID 2b, der Zuführspule 5b und der Elektrode 8b, und die Konfiguration aus der Sondenspule 6, dem SQUID 2a, der Zuführspule 5a und der Elektrode 8a spiegelbildlich zueinander.

**[0039]** Die Sondenspule 6 ist eine Spule mit einer Windung und ist entlang des äußeren Umfangs des Substrats 21 vorgesehen. Ein Ende der Sondenspule 6 ist über die Verdrahtung 11, welche die Zuführspule 5a übergreift, mit einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4a, welche Teil des SQUID 2a ist, verbunden. Ein anderes Ende der SQUID-Induktionsspule 4a ist über den supraleitenden Kontakt(bereich) 13 mit einem Ende der Zuführspule 5a verbunden. Ein anderes Ende der Zuführspule 5a ist mit einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4c, welche Teil des SQUID 2c und auf der unteren supraleitenden Lage DL ausgebildet ist, verbunden. Ein anderes Ende der SQUID-Induktionsspule 4c ist mit einem Ende der Zuführspule 5b verbunden. Ein anderes Ende der Zuführspule 5b ist über den supraleitenden Kontakt(bereich) 13 mit einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4b, welche Teil des SQUID 2b ist, verbunden. Ein anderes Ende der SQUID-Induktionsspule 4b ist über die Verdrahtung 11, welche die Zuführspule 5b übergreift, mit einem anderen Ende der Sondenspule 6 verbunden.

**[0040]** Genauer sind in dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 die Sondenspule 6, die SQUID-Induktionsspule 4a (SQUID 2a), die Zuführspule 5a, die SQUID-Induktionsspule 4c (SQUID 2c), die Zuführspule 5b und die SQUID-Induktionsspule 4b (SQUID 2b) in dieser Reihenfolge in Reihe geschaltet, um eine geschlossene Schleife 7 zu bilden. Aufgrund dieser Konfiguration fließt der Abschirmstrom  $I_p$ , der durch das äußere Magnetfeld B in der Sondenspule 6 erzeugt wird und durch diese fließt, direkt durch die SQUID-Induktionsspulen 4a, 4c, 4b, um eine Stromkopplung wie im Falle des direkt gekoppelten SQUID zu ermöglichen. Ferner fließt der Abschirmstrom  $I_p$ , der wegen des äußeren Magnetfelds B durch die Sondenspule 6 fließt, direkt durch die Zuführspulen 5a, 5b, um ein zum äußeren Magnetfeld B proportionales Magnetfeld in den Zuführspulen 5a, 5b zu erzeugen, wie beim SQUID vom Ketchen-Typ. Die Sondenspule 6 und die Zuführspulen 5a, 5b wirken als magnetischer Flusswandler. Da jede Windung der Zuführspulen 5a, 5b die SQUIDs 2a, 2b (SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b) umschließt, sind die Zuführspulen 5a, 5b magnetisch mit den SQUIDs 2a, 2b (SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b) gekoppelt. Das zu dem äußeren Magnetfeld B proportionale, in den Zuführspulen 5a, 5b erzeugte Magnetfeld wirkt auf die SQUIDs 2a, 2b (SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b). Als Ergebnis kann der Kopplungskoeffizient k deutlich stärker verbessert werden als im direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik. Da andererseits die Zuführspulen 5a, 5b nicht auf die SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b gestapelt sind, ist es möglich, kapazitive Komponenten zwischen den Zuführspulen 5a, 5b und den SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b stärker zu unterdrücken als im SQUID vom Ketchen-Typ des Stands der Technik. Dies ermöglicht es, eine Erzeugung von LC-Resonanz zu unterdrücken.

**[0041]** Man beachte, dass die Sondenspule 6 auch als eine Elektrode 9 fungiert. Die Messung des Magnetfeldes B durch den SQUID 2a umfasst das Treiben eines aufgeprägten Stromes zwischen der Elektrode 9 (Sondenspule 6) und der Elektrode 8a und das Messen einer Spannung dazwischen. Die Messung des Magnetfeldes B durch den SQUID 2b umfasst das Treiben eines auferäten Stroms zwischen der Elektrode 9 (Sondenspule 6) und der Elektrode 8b, und das Messen einer Spannung dazwischen. Das Messen des Magnetfeldes B durch den SQUID 2c umfasst das Treiben eines aufgeprägten Stroms zwischen der Elektrode 9 (Sondenspule 6) und der Elektrode 8c und das Messen einer Spannung dazwischen.

**[0042]** Die Elektrode 9 (Sondenspule 6) ist über die Verdrahtung 11 mit der oberen supraleitenden Lage UL (SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b) der SQUIDs 2a, 2b verbunden, und ferner über den supraleitenden Kontakt(bereich) 13 und die Zuführspulen 5a (5b) mit der unteren supraleitenden Lage DL (SQUID-Induktionsspule 4c) des SQUID 2c. Ferner sind die Elektroden 8a, 8b über den supraleitenden Kontakt(bereich) 14 mit der unteren supraleitenden Lage DL der SQUIDs 2a, 2b verbunden. Die Elektrode 8c ist mit der oberen supraleitenden Lage UL des SQUID 2c verbunden.

**[0043]** Fig. 2B zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs der SQUIDs 2a, 2c in Fig. 2A. Was den SQUID 2a betrifft, ist die Struktur die gleiche wie bei dem SQUID 2 in Fig. 1B, und daher wird deren Erläuterung ausgelassen. Der SQUID 2c umfasst zwei Josephson-Kontakte 3a, 3b und die SQUID-Induktionsspule 4c. Die beiden Josephson-Kontakte 3a, 3b und die SQUID-Induktionsspule 4c sind in Reihe geschaltet, und der SQUID 2c weist die Struktur einer geschlossenen Schleife auf. In der Darstellung der Fig. 2B sind die Josephson-Kontakte 3a, 3b des SQUID 2c als Josephson-Kontakte vom Rampenflanken-Typ beschrieben. Die Josephson-Kontakte 3a, 3b des SQUID 2c haben eine zweilagige Struktur, bei welcher die obere supraleitende Lage UL auf der Seite der Elektrode 8c auf der Rampenflanke der unteren supraleitenden Lage DL auf der Seite der SQUID-Induktionsspule 4c ausgebildet (angelegt) ist. Ferner, zur Erleichterung eines Vergleichs mit den SQUIDs 2a, 2b, hat die SQUID-Induktionsspule 4c die gleiche Größe wie die SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b, so dass die Induktivität der SQUID-Induktionsspule 4c gleich der der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b ist.

**[0044]** Fig. 2C zeigt ein Schaltbild des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Wie oben beschrieben sind bei dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 die Sondenspule 6, die SQUID-Induktionsspule 4a (SQUID 2a), die Zuführungsspule 5a, die SQUID-Induktionsspule 4c (SQUID 2c), die Zuführungsspule 5b und die SQUID-Induktionsspule 4b (SQUID 2b) in dieser Reihenfolge in Reihe geschaltet, um die geschlossene Schleife 7 zu bilden.

**[0045]** Die Fig. 3A bis Fig. 3D zeigen Querschnittsansichten des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung im Prozess der Herstellung. Man beachte, dass die Fig. 3A bis Fig. 3D Querschnittsansichten in Pfeilrichtung der A-A-Linie sind.

**[0046]** Zunächst, wie in Fig. 3A gezeigt, wurde ein Substrat 21 hergestellt, welches eine vierlagige Struktur aufweist. Ein Magnesiumoxid ( $\text{MgO}(100)$ ) Substrat 21a mit einer Größe von  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  wurde verwendet, auf welches eine  $\text{BaZrO}_3$ -Lage mit einer Schichtdicke von 5 nm als eine Pufferlage 21b zur Ausrichtungskontrolle, eine  $\text{Pr}_{1,4}\text{Ba}_{1,6}\text{Cu}_{2,6}\text{Ga}_{0,4}\text{O}_y$ -Lage mit einer Schichtdicke von 300 nm als eine schwarze, wärmeabsorbierende Lage 21c und eine  $\text{SrSnO}_3$ -Lage mit einer Schichtdicke von 250 nm als untere Isolierlage 21d in dieser Reihenfolge durch Off-Axis-Sputtern deponiert wurden. Dann wurde eine Lage  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (SmBCO) mit einer Schichtdicke von 250 nm als untere supraleitende Lage (erste supraleitende Lage) DL auf dem hergestellten Substrat 21 durch Off-Axis-Sputtern deponiert.

**[0047]** Dann, wie in Fig. 3B gezeigt, wurde die untere supraleitende Schicht (erste supraleitende Schicht) DL bearbeitet, um eine beabsichtigte Gestalt einer Schaltkreisstruktur (beispielsweise die Struktur eines Teils der Zuführungsspule 5 (52, 53) und der unteren supraleitenden Lage DL1) aufzuweisen. Man beachte, dass die Zuführungsspule 51 (siehe Fig. 2B) in der Beschreibung der Fig. 3A bis Fig. 3D ausgelassen ist, um Fig. 3A bis Fig. 3D nicht kompliziert werden zu lassen (Gleiches gilt im Weiteren). Die Ausbildung der Schaltkreisstrukturen erfolgte durch Photolithographie und ein Trockenätz-Verfahren unter Verwendung von Ionen-Ablation.

**[0048]** Dann, wie in Fig. 3B gezeigt, wurde als eine isolierende Zwischenlage 22 eine Lage  $\text{SrSnO}_3$  (SSO) mit einer Schichtdicke von 280 nm durch Off-Axis-Sputtern ausgebildet. Dann, wie in Fig. 3C gezeigt, wurde die isolierende Zwischenschicht 22 bearbeitet, um eine beabsichtigte Gestalt einer Schaltkreisstruktur aufzuweisen. Die Ausbildung der Schaltkreisstrukturen erfolgte durch Photolithographie und ein Trockenätz-Verfahren unter Verwendung von Ionen-Ablation. Durch das Ätzen der isolierenden Zwischenlage 22 wurden die Rampensteigung der Rampenflanken-Josephson-Kontakte 3a, 3b und die Rampensteigung für die Verbindung (den supraleitenden Kontaktbereich 14 und dergleichen) der unteren supraleitenden Lage (ersten supraleitenden Lage) DL und der oberen supraleitenden Lage (zweite supraleitende Lage) UL auf der isolierenden Zwischenschicht 22 und der unteren supraleitenden Schicht DL ausgebildet. Ebenso wurde durch das Ätzen der isolierenden Zwischenschicht 22 die untere supraleitende Schicht DL zusammen mit der isolierenden Zwischenschicht 22 bearbeitet, um eine beabsichtigte Gestalt einer Schaltkreisstruktur (beispielsweise die Struktur des verbleibenden Teils der Zuführungsspule 5 (52, 53)) aufzuweisen. Es werden bei dem Ätzprozess nämlich die untere supraleitende Lage (erste supraleitende Lage) DL und die isolierende Zwischenschicht 22 gleichzeitig geätzt.

**[0049]** Dann wurde, wie in Fig. 3C gezeigt, als obere supraleitende Lage (zweite supraleitende Schicht) UL eine Lage  $\text{La}_{0,1}\text{-Er}_{0,95}\text{Ba}_{1,95}\text{Cu}_3\text{O}_y$  (L1ErBCO) mit einer Schichtdicke von 250 nm durch Laserdeposition hergestellt. Die obere supraleitende Lage UL wird auf der Rampensteigung der unteren supraleitenden Lage (erste supraleitende Lage) DL der Rampenflanken-Josephson-Kontakte 3a, 3b ausgebildet, um dadurch die Rampenflanken-Josephson-Kontakte 3a, 3b zu vervollständigen. Die obere supraleitende Lage UL ist auf der Rampensteigung der unteren supraleitenden Lage DL des supraleitenden Kontaktbereichs 14 und dergleichen ausgebildet, um dadurch die untere supraleitende Schicht DL und die obere supraleitende Schicht UL zu verbinden. Ferner wurde auf der ausgebildeten oberen supraleitenden Lage UL eine Goldschicht mit einer Schichtdicke von 100 nm als eine Elektrodenlage 23 aus Gold (Au) durch Sputtern ausgebildet.

**[0050]** Dann, wie in Fig. 3D gezeigt, wurden die Elektrodenlage 23 aus Gold und die obere supraleitende Lage UL bearbeitet, um eine beabsichtigte Gestalt einer Schaltkreisstruktur (beispielsweise die Struktur der SQUID-Induktionsspule 4a, der Sondenspule 6, der Elektrode 8a und dergleichen) aufzuweisen. Hinsichtlich der Zuführungsspule 5 beachte man, dass in einem Bereich, oberhalb dessen die Verdrahtung 17 der oberen supraleitenden Lage UL und dergleichen nicht angeordnet sind, die obere supraleitende Lage UL nicht nur entfernt wird, sondern auch Teile der Rampensteigung der Zuführungsspule 5 geätzt werden, wobei die isolierende Zwischenlage 22 als Maske verwendet wird. Dies ermöglicht es, nebeneinander liegende Wicklungen (Windungen) der Zuführungsspule 5 zuverlässig voneinander zu trennen. Die Ausbildung der Schaltkreisstrukturen erfolgte durch Photolithographie und ein Trockenätz-Verfahren mit Ionen-Ablation. Ferner wird, da die obere

supraleitende Lage UL und die Elektrodenlage 23 (siehe **Fig. 3C**) aus Gold gleichzeitig geätzt werden, die gesamte Oberfläche der oberen supraleitenden Lage UL mit der Elektrodenlage 23 aus Gold bedeckt.

**[0051]** Dann wurde der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 in einer Sauerstoffatmosphäre von Atmosphärendruck auf 400 bis 500 Grad Celsius erhitzt, um einer Wärmebehandlung unterzogen zu werden, welche mit Oxidation der unteren supraleitenden Lage DL und der oberen supraleitenden Lage UL einhergeht. Abschließend wurde der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 hermetisch verpackt, zusammen mit einem Heizelement zum Heizen.

**[0052]** **Fig. 4A** zeigt ein Diagramm welches eine Beziehung zwischen der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  in den SQUIDs 2a, 2b, 2c, welche in dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung vorgesehen sind, und der Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b darstellt. Als Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b werden die Fälle 0 (null) Windungen (die Zuführspulen 5a, 5b sind weggelassen), 3 Windungen und 6 Windungen beschrieben. Obwohl in dem in **Fig. 2A** beschriebenen Beispiel der Fall dreier Windungen als Windungszahl der Zuführspulen 5a, 5b erläutert worden ist, wurden zusätzlich auch ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1, bei dem die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b 0 Windungen beträgt, und ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1, bei dem die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b 6 Windungen beträgt, hergestellt. Man beachte, dass als Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor, bei dem die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b 0 Windungen beträgt, ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor mit einem direkt gekoppelten SQUID (Schlitz-Loch-Typ) gemäß dem Stand der Technik verwendet werden kann.

**[0053]** Die Messung der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  wurde wie später beschrieben durchgeführt. Zuerst wurde der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 in flüssigen Stickstoff eingetaucht, um abgekühlt zu werden. Dann wurde eine Rückkopplungskontrolle unter Verwendung eines fluxverriegelten Schleifenkreises (flux locked loop circuit, FLL-Kreis) durchgeführt, um den Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 in einen Zustand zu versetzen, in dem eine magnetische Messung möglich ist. Dann wurde zur Erzeugung des äußeren Magnetfelds  $B$  eine Spule mit einem Durchmesser von 150 mm, einer Länge von 450 mm und einer Spulenkonstanten von 5,09 mT/A vorbereitet und der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 wurde im Zentrum der Spule angeordnet. Indem man einen elektrischen Strom (70 Hz, Sinuswelle) von 19,17  $\mu\text{A}_{\text{pp}}$  (peak to peak) durch die Spule leitete, wurde das äußere Magnetfeld  $B$  von 97,5 nT<sub>pp</sub> erzeugt und wirkte dann senkrecht zu der Fläche (der den magnetischen Fluss einschließende Fläche) der Sondenspule 6 im Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1. Aus dem Verhältnis ( $\Phi_S / B$ , siehe Formel (2)) des magnetischen Flusses  $\Phi_S$ , der durch die jeweiligen SQUIDs 2a, 2b, 2c des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 dabei detektiert wird und dem äußeren Magnetfeld  $B$  wurde die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ , welche eine Detektionseffizienz als Magnetsensor für jeden der SQUIDs 2a, 2b, 2c darstellt, berechnet. Man beachte, dass die jeweiligen Induktivitäten  $L_s$  der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b, 4c der SQUIDs 2a, 2b, 2c alle ungefähr 55 pH und gleich waren.

**[0054]** Mit „○“ markierte Daten in **Fig. 4a** zeigen die Abhängigkeit der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2a, der von der Zuführspule 5a umschlossen ist, von der Anzahl der Windungen der Zuführspule 5a. Mit „○“ markierte Daten für Windungszahl 0 der Zuführspule 5a stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  eines direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik dar und wurden mit einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor gemessen, der lediglich den direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik aufweist. Die mit „○“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 0 Windungen waren 0,3 mm<sup>2</sup>.

**[0055]** Mit „○“ markierte Daten für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführspule 5a 3 Windungen beträgt, stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2a dar, der von der Zuführspule 5a mit 3 Windungen umschlossen wird. Die mit „○“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 3 Windungen wurden zweimal gemessen, um die Reproduzierbarkeit zu bestätigen, und waren 0,45 mm<sup>2</sup> und 0,44 mm<sup>2</sup>. Ferner wurde die Messung auch für den SQUID 2b durchgeführt und die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  wurde als äquivalent zu der des SQUID 2a erhalten.

**[0056]** Mit „○“ markierte Daten für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführspule 5a 6 Windungen beträgt, stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2a, der von der Zuführspule 5a mit 6 Windungen umschlossen wird, dar. Die mit „○“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 6 Windungen war 0,36 mm<sup>2</sup>. Ferner wurde die Messung auch für den SQUID 2b durchgeführt und die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  wurde als äquivalent zu der des SQUID 2a erhalten.

**[0057]** Aus Obigem folgt, dass im Vergleich zur effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,3 \text{ mm}^2$ ) für Windungszahl 0 der Zuführungspule 5a die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,45 \text{ mm}^2$ ) bei 3 Windungen um einen Faktor 1,5 erhöht ist, und die effektive Fläche ( $0,36 \text{ mm}^2$ ) für 6 Windungen um einen Faktor 1,2 erhöht ist. Werden die mit „○“ markierten Daten glatt mit einer durchgezogenen Linie verbunden, wird davon ausgegangen, dass die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  der SQUIDs 2a, 2b im Vergleich zum Fall von 0 Windungen auch dann erhöht ist, wenn die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b 1 Windung beträgt. Daher wird angenommen, dass die Zuführungspulen 5a, 5b eine Erhöhung der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  bewirken, und auch dann wirksam sind, wenn die Anzahl ihrer Windungen 1 Windung ist. Man beachte, dass, theoretisch betrachtet, je höher die Anzahl der Windungen wird, desto höher auch die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) wird, und dass daher die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  anwachsen sollte. Jedoch ist die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,36 \text{ mm}^2$ ) für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b 6 Windungen beträgt, kleiner als die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,45 \text{ mm}^2$ ) für den Fall von 3 Windungen. Um die Ursache dieser Abweichung zu erklären, wurde die Abhängigkeit der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c von der Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b ausgewertet (gemessen), wie unten beschrieben.

**[0058]** Mit „Δ“ markierte Daten in **Fig. 4A** zeigen die Abhängigkeit der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c, der nicht von den Zuführungspulen 5a, 5b umschlossen ist (ohne die Zuführungspulen 5a, 5b) in Abhängigkeit von der Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b. „Δ“ markierte Daten für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b 0 Windungen beträgt, stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  eines direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik dar, welche mit einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor, der lediglich den direkt gekoppelten SQUID des Stands der Technik aufweist, gemessen wurde. Die mit „Δ“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 0 Windungen sind nämlich gleich den mit „○“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 0 Windungen,  $0,3 \text{ mm}^2$ .

**[0059]** Mit „Δ“ markierte Daten für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspule 5a 3 Windungen beträgt, stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c dar, der sich außerhalb der Zuführungspulen 5a, 5b mit 3 Windungen befindet und nicht umschlossen ist. Die mit „Δ“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 3 Windungen war  $0,25 \text{ mm}^2$ .

**[0060]** Mit „Δ“ markierte Daten für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspule 5a 6 Windungen beträgt, stellen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c dar, der sich außerhalb der Zuführungspulen 5a, 5b mit 6 Windungen befindet und nicht umschlossen ist. Die mit „Δ“ markierten Daten (effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$ ) für 6 Windungen war  $0,17 \text{ mm}^2$ .

**[0061]** Aus dem Obigen ergibt sich die Tendenz, dass die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c monoton abnimmt, wenn die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b zunimmt. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Zuführungspulen 5a, 5b in Reihe mit der geschlossenen Schleife 7, welche die Sondenspule 6 beinhaltet, durch welche der Abschirmstrom  $I_p$  fließt, geschaltet sind, und daher die Induktivität  $L_{2i}$  der Zuführungspulen 5a, 5b mit einem Anwachsen der Anzahl der Windungen anwächst, während der Abschirmstrom  $I_p$  abnimmt. Ferner, da die Induktivität  $L_{2i}$  der Zuführungspulen 5a, 5b gemeinhin proportional zum Quadrat der Anzahl der Windungen anwächst, wird ein Verhältnis der Abnahme der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  zum Zuwachs der Anzahl der Windungen groß, wenn die Anzahl der Windungen anwächst. Im Hinblick auf die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  der SQUIDs 2a, 2b (mit „○“ markierte Daten in **Fig. 4A**) wird nämlich angenommen, dass der Grund, aus welchem die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,36 \text{ mm}^2$ ) im Falle, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b 6 Windungen beträgt, kleiner ist als die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ( $0,45 \text{ mm}^2$ ) bei 3 Windungen, ist, dass der Abschirmstrom  $I_p$  mit Zunahme der Induktivität  $L_{2i}$  der Zuführungspulen 5a, 5b abnimmt. Verglichen mit dem Maß des Zuwachses der Induktivität  $L_{2i}$  (dem Maß der Abnahme des Abschirmstroms  $I_p$ ) im Falle, dass die Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b von 0 auf drei Windungen erhöht wird, ist das Maß des Zuwachses der Induktivität  $L_{2i}$  (das Maß der Abnahme des Abschirmstroms  $I_p$ ) im Falle einer Erhöhung von 3 Windungen auf 6 Windungen größer. Daher wird angenommen, dass im Falle der Erhöhung der Anzahl der Windungen von 0 Windungen auf 3 Windungen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  zunimmt, da ihre Zunahme ihre Abnahme übertrifft, während im Falle der Erhöhung von 3 Windungen auf 6 Windungen die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  abnimmt, da ihre Abnahme ihre Zunahme übertrifft.

**[0062]** **Fig. 4B** zeigt ein Diagramm, welches eine Beziehung zwischen dem Verhältnis der effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  der SQUIDs 2a, 2b (mit „○“ markierte Daten in **Fig. 4A**) zur effektiven Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2c (mit „Δ“ markierte Daten in **Fig. 4A**), der in dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung vorgesehen ist, und der Anzahl der Windungen der Zuführungspulen 5a, 5b darstellt. **Fig. 4B** (mit „□“ markierte Daten) zeigt nämlich Werte der mit „○“ markierten Daten (Werte) dividiert durch die mit „Δ“ markierten Daten (Werte) für jeweils 0 Windungen, 3 Windungen und 6

Windungen als Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b in **Fig. 4A**. Es ist ersichtlich, dass die Abnahme des Abschirmstroms  $I_p$  mit der Zunahme der Induktivität  $L_{2i}$  die mit „o“ markierten Daten und die mit „Δ“ markierten Daten für die gleiche Anzahl von Windungen in **Fig. 4A** in gleichem Maße beeinflusst. Deshalb kann diese Wirkung beseitigt werden, indem ein Verhältnis der mit „o“ markierten Daten zu den mit „Δ“ markierten Daten berechnet wird. Ferner, indem man das Verhältnis der mit „o“ markierten Daten zu den mit „Δ“ markierten Daten berechnet, ist es möglich, die Bedingung auszuwerten, in der die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) mit der Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b zunimmt. Es ist ersichtlich, dass **Fig. 4B** die Abhängigkeit der magnetischen Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) von der Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b zeigt. Aus **Fig. 4B** ist ersichtlich, dass die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) monoton mit der Anzahl der Windungen anwächst. Ferner wurde festgestellt, dass, im Vergleich mit dem Maß des Zuwachses bei der magnetischen Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ), für den Fall, dass die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b von 0 Windungen auf 3 Windungen erhöht wird, das Maß des Zuwachses bei der magnetischen Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) im Falle der Erhöhung von 3 Windungen auf 6 Windungen kleiner war. Es wird angenommen, dass dies daran liegt, dass, wenn die Anzahl der Windungen bei einer ebenen Spule wie den Zuführspulen 5a, 5b erhöht wird, ein Außendurchmesser der Zuführspulen 5a, 5b zunimmt (ein Außendurchmesser der Zuführspule 52 ist größer als der der Zuführspule 51, und ein Außendurchmesser der Zuführspule 53 ist größer als der der Zuführspule 52), und dementsprechend nimmt die magnetische Kopplung zwischen der äußeren Zuführspule 53 (52) und den SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b ab. Daher wird es als hinsichtlich der Verbesserung der Empfindlichkeit effektiv angesehen, zum Beispiel die Linienbreite der Zuführspulen 5a, 5b dünn zu machen, um ein Anwachsen des Außendurchmessers der Zuführspule 53 (52) zu unterdrücken.

**[0063]** Aus Obigem geht hervor, dass die maximale effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  und die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b, für welche die maximale effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  erhalten wird, durch einen Kompromiss zwischen dem Anwachsen der magnetischen Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) bei anwachsender Anzahl der Windungen und der Abnahme des Abschirmstromes  $I_p$  (Zunahme der Induktivitäten  $L_{2i}$ ) bei anwachsender Anzahl der Windungen bestimmt wird. Daher erreicht im Beispiel der mit „o“ markierten Daten in **Fig. 4A** die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ein Maximum, wenn die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b 3 Windungen beträgt. Die Anzahl der Windungen, für welche die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  ihr Maximum erreicht, hängt von Formen und Strukturen der Zuführspulen 5a, 5b, der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b und dergleichen ab. Befindet sich die Anzahl der Windungen im Bereich von 1 Windung oder mehr und 6 Windungen oder weniger, kann die maximale effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  oder die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  von einer mit der maximalen vergleichbaren Größe erzielt werden.

**[0064]** **Fig. 5** zeigt ein Diagramm, welches die Rausch-Charakteristik des Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt. Die Rausch-Charakteristik wurde wie folgt gemessen. Zunächst wurde der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 in flüssigen Stickstoff getaucht, und bei angelegtem äußerem Magnetfeld  $B$  wurde ein elektrischer Strom von 100 mA für 15 Sekunden durch das mit dem Sensor zusammengepackte Heizelement getrieben. Nach Unterbrechung des Stromes wurde der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 wiederum im Magnetfeld abgekühlt. Daraufhin wurden Rauschspektren als Rauschcharakteristiken gemessen.

**[0065]** Da der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 auf eine Temperatur aufgeheizt wird, welche über der kritischen Temperatur für die Supraleitung liegt und wieder auf eine Temperatur abgekühlt wird, welche niedriger ist als die kritische Temperatur für die Supraleitung, wird davon ausgegangen, dass, wenn die Temperatur höher ist als die kritische Temperatur für die Supraleitung, der magnetische Fluss des äußeren magnetischen Feldes  $B$  in das Innere der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b eindringt. Dann wurde durch die Wiederabkühlung beurteilt, ob ein Einschluss magnetischen Flusses auftrat oder nicht. Diese Beurteilung erfolgte durch einen Vergleich eines Rauschspektrums, welches bei Abkühlung im äußeren Magnetfeld  $B$  gemessen wurde, mit einem Rauschspektrum, welches bei Abkühlung ohne Magnetfeld, ohne Einwirkung des äußeren Magnetfeldes  $B$ , gemessen wurde. Wuchs die Intensität des Rauschspektrums, das bei Abkühlung im äußeren Magnetfeld  $B$  gemessen wurde, viel stärker an als diejenige des Rauschspektrums, welches ohne äußeres Feld gemessen wurde, so wurde dies als Auftreten des Einschlusses magnetischen Flusses beurteilt. Wie in **Fig. 5** gezeigt, wurde die Messung der Rauschspektren durchgeführt, wenn beim Wiederabkühlen das äußere Magnetfeld  $B$  Null ( $0 \mu\text{T}$ ) (Spektrum für das Beurteilungskriterium),  $30 \mu\text{T}$  und  $60 \mu\text{T}$  war. Man beachte, dass, obwohl das äußere Magnetfeld  $B$  erzeugt wurde, indem man einen elektrischen Strom von einer weiteren Batterie durch die Spule leitete, die Rauschspektren nach Entfernen des äußeren Magnetfeldes  $B$  (bei Magnetfeld Null), nachdem die Temperatur durch das Wiederabkühlen abgenommen hatte, gemessen wurden, da das angelegte äußere Magnetfeld  $B$  Rauschen zeigte, welches von der weiteren Batterie herrührte. Der Grund ist, dass bei Auftreten des Einschlusses magnetischen Flusses während der

Abkühlung im äußeren Magnetfeld  $B$  der im Supraleiter eingeschlossene magnetische Fluss verbleibt, selbst wenn das äußere Magnetfeld  $B$  entfernt wird, so das das Magnetfeld Null ist.

**[0066]** Wie in **Fig. 5** gezeigt waren die Intensität des Rauschspektrums, welches im Falle, dass das äußere Magnetfeld  $B$  beim Wiederabkühlen  $30 \mu\text{T}$  war, gemessen wurde, und die Intensität des Rauschspektrums, welches bei  $60 \mu\text{T}$  gemessen wurde, im gesamten Frequenzband ähnlich der Intensität des Rauschspektrums (Spektrum für das Beurteilungskriterium), welches bei Magnetfeld Null ( $0 \mu\text{T}$ ) gemessen wurde. Daraus wurde gefolgert, dass kein Einschluss magnetischen Flusses in den SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b auftrat, selbst wenn das äußere Magnetfeld  $B$  beim Wiederabkühlen  $30 \mu\text{T}$  oder  $60 \mu\text{T}$  war. Da  $60 \mu\text{T}$  ein höherer Wert ist als das Erdmagnetfeld (z.B.  $50 \mu\text{T}$ ), ermöglicht der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 eine hochempfindliche magnetische Messung ohne Auftreten eines Einschlusses magnetischen Flusses, selbst in einer nicht abgeschirmtem Umgebung. Gemäß der Formel (3) beträgt, wenn die Breite  $W_2$  (siehe **Fig. 1B**) der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b  $5 \mu\text{m}$  ist, das maximale Magnetfeld (Schwellenmagnetfeld)  $B_{th}$ , in welchem der Supraleiter den magnetischen Fluss nach außen drängen kann,  $65 \mu\text{T}$ , was unser Messergebnis, bei welchem bei  $60 \mu\text{T}$  und  $30 \mu\text{T}$  ein Einschluss magnetischen Flusses nicht auftrat, stützt.

**[0067]** Gemäß der Formel (3) wird, bei doppelter Breite  $W_2$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $B_{th}$  ein Viertel,  $16 \mu\text{T}$ . Selbst in diesem Fall sind die Richtung des Erdmagnetfeldes und die Richtung senkrecht zur supraleitenden dünnen Schicht (obere supraleitende Lage UL), welche die SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b bildet, nicht in Übereinstimmung, und dementsprechend ist davon auszugehen, dass, wenn die Komponente senkrecht zu der supraleitenden dünnen Schicht, welche die SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b bildet,  $16 \mu\text{T}$  oder weniger ist, ein Einschluss magnetischen Flusses nicht leicht auftritt.

**[0068]** Ist eine Abkühlung (Verwendung) im äußeren Magnetfeld  $B$  mit größerer Stärke erforderlich, wird es als effektiv angesehen, die Linienbreite der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b dünner zu machen. Beispielsweise ist, bei halber Linienbreite,  $2,5 \mu\text{m}$ , eine hochempfindliche magnetische Messung möglich, ohne dass ein Einschluss magnetischen Flusses auftritt, selbst bei Abkühlung (Verwendung) im äußeren Magnetfeld  $B$  von  $120 \mu\text{T}$ . Es ist daher aus dem Grund fehlender Notwendigkeit, die Zuführspulen 5a, 5b auf den SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b auszubilden, dass die Breite der SQUID-Induktionsspulen 4a, 4b dünn gemacht werden kann.

(Dritte Ausführungsform)

**[0069]** **Fig. 6A** zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der dritten Ausführungsform unterscheidet sich von dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der ersten Ausführungsform darin, dass die SQUID-Induktionsspule 4 auf der unteren supraleitenden Lage DL und die Zuführspule 5 auf der oberen supraleitenden Lage UL ausgebildet ist. Mit diesem Unterschied ist der obere supraleitende Bereich UL1 mit der SQUID-Induktionsspule 4 an den Josephson-Kontakten 3a, 3b verbunden. Ferner ist der obere supraleitende Bereich UL1 mit der Elektrode 8 über den supraleitenden Kontakt(bereich) 14, eine Verdrahtung 19, welche auf der unteren supraleitenden Lage DL ausgebildet ist, und einen supraleitenden Kontakt(bereich) 15 verbunden. Die Verdrahtung 19 verläuft unter der Zuführspule 5 und ist mit der Elektrode 8 außerhalb der Zuführspule 5 verbunden. Ferner ist ein Verbindungsteil zwischen einem Ende der SQUID-Induktionsspule 4 und dem Josephson-Kontakt 3a über den supraleitenden Kontakt(bereich) 13 mit der Zuführspule 5 (51) verbunden. Ein Verbindungsteil zwischen einem Ende (einem anderen Ende) der SQUID-Induktionsspule 4 und dem Josephson-Kontakt 3b ist über eine Verdrahtung 18 und einen supraleitenden Kontakt(bereich) 16 mit einem Ende der SONDENSPULE 6 verbunden. Die Verdrahtung 18 verläuft unter der Zuführspule 5 und ist mit der SONDENSPULE 6 außerhalb der Zuführspule 5 verbunden. Ein Ende (ein anderes Ende) der SONDENSPULE 6 ist mit der Zuführspule 5 (53) verbunden. Die Anzahl der Herstellungsschritte und der Herstellungsprozess sind die gleichen, wie im Beispiel der zweiten Ausführungsform. Die Linienbreite des Supraleiters, welcher die SQUID-Induktionsspule 4 darstellt, die Größe der SONDENSPULE und dergleichen sind ebenso von gleicher Gestalt wie das Beispiel in der zweiten Ausführungsform.

**[0070]** Die Wicklung der Zuführspule 5 (51, 52, 53) und die Verdrahtungen 18, 19 schneiden einander unter einem von einem rechten Winkel verschiedenen Winkel. Ferner wird die Linienbreite der Zuführspule 5 (51, 52, 53) im Schnittbereich größer als im anderen Bereich. Das ermöglicht es, die Steigung, mit der die Zuführspule 5 (51, 52, 53) über die Verdrahtungen 18, 19 greift, zu reduzieren, und eine zuverlässige Leitung zu verwirklichen. Ferner ist es möglich, Herstellungsdefekte zu unterdrücken, wie zum Beispiel eine unterbrochene Verbindung.

**[0071]** Die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2 war  $0,45 \text{ mm}^2$ . Dieser Wert war ungefähr der gleiche wie der im Falle, dass die Anzahl der Windungen der Zuführspulen 5a, 5b 3 Windungen ist, in der zweiten Ausführungsform. Ferner war die Linienbreite des Supraleiters, der die SQUID-Induktionsspule 4 bildet,  $5 \text{ }\mu\text{m}$ , und ein Einschluss magnetischen Flusses trat nicht auf, selbst wenn in dem Magnetfeld  $B$  von  $60 \text{ }\mu\text{T}$  abgekühlt wurde.

(Vierte Ausführungsform)

**[0072]** Fig. 6B zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der vierten Ausführungsform unterscheidet sich vom Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der dritten Ausführungsform darin, dass die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 so angeordnet ist, dass sie in ebener Ansicht die SQUID-Induktionsspule 4 überlappt. Die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 und die SQUID-Induktionsspule 4 sind auf den voneinander verschiedenen supraleitenden Lagen ausgebildet, der unteren supraleitenden Lage DL und der oberen supraleitenden Lage UL, und sind mit der isolierenden Lage 22 (siehe Fig. 3B bis Fig. 3D) dazwischen gestapelt. Die effektive Fläche  $A_{\text{eff}}$  des SQUID 2 war  $0,55 \text{ mm}^2$ . Dieser Wert ist stärker erhöht als  $0,45 \text{ mm}^2$  in der dritten Ausführungsform. Dies wird darauf zurückgeführt, dass, da die innerste Umfangswicklung 51 der Zuführspule 5 die SQUID-Induktionsspule 4 überlappt, die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zwischen der Zuführspule 5 und der SQUID-Induktionsspule 4 erhöht ist. Ferner, da die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 die SQUID-Induktionsspule 4 überlappt, ist es möglich, die Zuführspule 52, 53 (5) von geringer Größe zu gestalten, und den Abstand zwischen der Zuführspule 52, 53 und der SQUID-Induktionsspule 4 zu verringern. Daher wird es darauf zurückgeführt, dass die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zwischen der Zuführspule 52, 53 (5) und der SQUID-Induktionsspule 4 auch erhöht ist.

**[0073]** Ferner betrug die Linienbreite der SQUID-Induktionsspule 4  $5 \text{ }\mu\text{m}$ , und ein Einschluss magnetischen Flusses trat nicht auf, selbst wenn im Magnetfeld von  $60 \text{ }\mu\text{T}$  abgekühlt wurde. Ferner wurde keine Erzeugung von LC-Resonanz, wie sie beim SQUID vom Ketchen-Typ festgestellt wurde, gefunden. Es wird angenommen, dass, obwohl eine große kapazitive Komponente zwischen der Zuführspule 51 und der SQUID-Induktionsspule 4, die einander überlappen, erzeugt wird, eine LC-Resonanz nicht erzeugt wurde, weil die erzeugte kapazitive Komponente klein ist im Vergleich mit dem SQUID von Ketchen-Typ, bei dem alle Zuführspulen, mit vielen Windungen, auf die SQUID-Induktionsspule gestapelt sind.

(Fünfte Ausführungsform)

**[0074]** Fig. 7 zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 in einem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 gemäß einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der fünften Ausführungsform unterscheidet sich von dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der ersten Ausführungsform darin, dass die Breite  $W1$  der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$  des SQUID 2 in der Anordnungsrichtung, in welcher ein Paar von Josephson-Kontakten 3a, 3b angeordnet sind, größer ist als der Abstand  $d$  zwischen dem Paar von Josephson-Kontakten 3a, 3b ( $W1 > d$ ). Damit hat die den magnetischen Fluss einschließende Fläche des SQUID 2 Quadratform, und ist nicht vom Schlitz-Loch-Typ, der in dem direkt-gekoppelten SQUID verwendet wird.

**[0075]** Bei der vorliegenden Erfindung ist der Abschirmstrom  $I_p$ , der durch die Sondenspule 6 fließt, mit der SQUID-Induktionsspule 4 sowohl über die direkte Kopplung (Stromkopplung) als auch die magnetische Kopplung gekoppelt. Die Kopplungseffizienz der direkten Kopplung ist proportional zu der Induktivität  $L_s$  der SQUID-Induktionsspule 4. Andererseits hängt die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zwischen der Zuführspule 5 und der SQUID-Induktionsspule 4 von der Fläche der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$  der SQUID-Induktionsspule 4 ab. Selbst für eine SQUID-Induktionsspule 4 der gleichen Induktivität  $L_s$  wird die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) umso größer, je größer die von der SQUID-Induktionsspule 4 umschlossene Fläche (die Fläche der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$ ) wird. Man beachte, dass, selbst wenn die Fläche der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$  der SQUID-Induktionsspule 4 erhöht wird, ein Einschluss magnetischen Flusses nicht auftritt, da die Linienbreite der SQUID-Induktionsspule 4 dünn ist. Ebenso ist die Form der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche  $S$  der SQUID-Induktionsspule 4 nicht auf das Quadrat beschränkt, und kann ein Kreis, ein Achteck und dergleichen sein, welche gleichermaßen eine die den magnetischen Fluss einschließende Fläche der SQUID-Induktionsspule 4 vergrößernde Wirkung haben. Ferner ist die Anzahl der Windungen der Zuführspule 5 (51, 52, 53, 54) auf 4 Windungen erhöht. Dies ermöglicht es, die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zu erhöhen. Ferner, ebenso wie bei der dritten und der vierten Ausführungsform, ist

es möglich, die SQUID-Induktionsspule 4 mit der unteren supraleitenden Lage DL auszubilden, und die Zuführspule 5 mit der oberen supraleitenden Lage UL auszubilden. Ferner kann, wie bei der vierten Ausführungsform, die innerste Umfangswindung 51 mit der SQUID-Induktionsspule 4 überlappen.

(Sechste Ausführungsform)

**[0076] Fig. 8** zeigt eine vergrößerte Ansicht des Umfangs des SQUID 2 eines Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensors 1 gemäß einer sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der sechsten Ausführungsform unterscheidet sich von dem Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor 1 der dritten und der vierten Ausführungsform darin, dass, in ebener Ansicht, die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 so angeordnet ist, dass sie von der SQUID-Induktionsspule 4 umschlossen wird, und dass die zweite Windung 52 im Inneren der Zuführspule 5 so angeordnet ist, dass sie die SQUID-Induktionsspule 4 überlappt. Die zweite Windung 52 im Inneren der Zuführspule 5 und die SQUID-Induktionsspule 4 sind auf voneinander verschiedenen supraleitenden Lagen ausgebildet, der unteren supraleitenden Lage DL und der oberen supraleitenden Lage UL, und sind mit der isolierenden Lage 22 (siehe **Fig. 3B** bis **Fig. 3D**) dazwischen gestapelt. In ebener Ansicht ist die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 innerhalb der SQUID-Induktionsspule 4 (in der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche S) angeordnet. Aufgrund dieser Konfiguration ist die Breite  $W_1$  der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche S des SQUID 2 in der Anordnungsrichtung, in der ein Paar von Josephson-Kontakten 3a, 3b angeordnet sind, größer, als der Abstand  $d$  zwischen dem Paar von Josephson-Kontakten 3a, 3b ( $W_1 > d$ ). Die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 ist über den supraleitenden Kontakt(bereich) 13 mit der SQUID-Induktionsspule 4 verbunden und ist entlang des inneren Umfangs der SQUID-Induktionsspule 4 angeordnet. Die zweite Windung 52 aus dem Inneren der Zuführspule 5 ist so angeordnet, dass sie oberhalb der SQUID-Induktionsspule 4 verläuft. Die dritte Windung 53 aus dem Inneren der Zuführspule 5 ist entlang des äußeren Umfangs der SQUID-Induktionsspule 4 angeordnet. Ferner ist der supraleitende Kontakt(bereich) 13 innerhalb der Zuführspule 5 (52, 53) und innerhalb des SQUID 2 (SQUID-Induktionsspule 4) (in der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche S) angeordnet. Die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zwischen der Zuführspule 5 (51, 52, 53) und der SQUID-Induktionsspule 4 nimmt zu, wenn der Abstand zwischen ihnen abnimmt. Bei der vorliegenden sechsten Ausführungsform wird die Anordnung der dritten Windung 53 aus dem Inneren der Zuführspule 5 nahe bei der SQUID-Induktionsspule 4 dadurch erreicht, dass die innerste Umfangswindung 51 der Zuführspule 5 innerhalb der SQUID-Induktionsspule 4 angeordnet wird. Es ist einfach möglich, die Summe aus dem Abstand zwischen der Zuführspule 51 und der SQUID-Induktionsspule 4, dem Abstand zwischen der Zuführspule 52 und der SQUID-Induktionsspule 4 und dem Abstand zwischen der Zuführspule 53 und der SQUID-Induktionsspule 4 im Vergleich mit der dritten Ausführungsform und dergleichen zu verringern, und die magnetische Kopplung (Kopplungskoeffizient  $k$ ) zwischen der Zuführspule 5 (51, 52, 53) und der SQUID-Induktionsspule 4 zu erhöhen.

#### Bezugszeichenliste

1	Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor
2, 2a, 2b, 2c	Supraleitendes-Quanten-Interferenz-Device (SQUID)
3a, 3b	Josephson-Kontakte (Rampenflanken-Typ)
3c	Anordnungsrichtung der Josephson-Kontakte
4, 4a, 4b, 4c	SQUID-Induktionsspule
5, 5a, 5b	Zuführspule
51	innerste Umfangswindung
52	zweite Windung von innen
53	dritte Windung von innen
54	vierte Windung von innen
6	Sondenspule
7	geschlossene Schleife (magnetischer Flusswandler)
8, 8a, 8b, 8c	Elektrode
9	Elektrode

11	Verdrahtung
12, 13, 14, 15, 16	supraleitender Kontakt(bereich) (Kontaktloch)
17, 18, 19	Verdrahtung
21	Substrat
21a	MgO Substrat
21b	Pufferlage zur Ausrichtungskontrolle
21c	schwarze, wärmeabsorbierende Lage
21d	untere Isolierlage
22	isolierende Zwischenlage (Isolierlage)
23	Elektrodenlage aus Gold
DL	untere supraleitende Lage
UL	obere supraleitende Lage
d	Abstand zwischen Josephson-Kontakten
S	den magnetischen Fluss einschließende Fläche des SQUID
W1	Breite der den magnetischen Fluss einschließenden Fläche des SQUID
W2	Linienbreite der SQUID-Induktionsspule
W3	Linienbreite der Zuführspule

### Patentansprüche

1. Ein Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) mit auf einem Substrat (21) ausgebildeten supraleitenden Lagen (DL, UL), wobei ein Supraleitendes-Quanten-Interferenz-Device (SQUID) (2) auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet ist, und wobei der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) umfasst:

eine Sondenspule (6), welche auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet und mit einer Induktionsspule (4) des SQUID (2) verbunden ist; und

eine Zuführspule (5), welche auf den supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet, mit der Induktionsspule (4) des SQUID (2) und mit der Sondenspule (6) zu einer geschlossenen Schleife (7) verbunden und magnetisch mit der Induktionsspule (4) des SQUID (2) verbunden ist, wobei in ebener Ansicht zumindest eine Windung der Zuführspule (5) die Induktionsspule (4) des SQUID (2) umschließt oder von der Induktionsspule (4) des SQUID (2) umschlossen wird.

2. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 1, wobei die Zuführspule (5) eine Vielzahl von Windungen aufweist und einige Windungen der Vielzahl von Windungen so angeordnet sind, dass sie bei ebener Ansicht die Induktionsspule (4) des SQUID (2) überlappen.

3. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 2, wobei zumindest einige der Windungen der Vielzahl von Windungen und die Induktionsspule (4) des SQUID (2) auf voneinander verschiedenen supraleitenden Lagen (DL, UL) ausgebildet sind, und die voneinander verschiedenen supraleitenden Lagen (DL, UL) mit einer zwischen ihnen angeordneten isolierenden Lage (22) gestapelt sind.

4. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 1, wobei eine Linienbreite (W2) der Induktionsspule (4) des SQUID (2) gleich oder kleiner als 10  $\mu\text{m}$  ist.

5. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 1, wobei eine Breite (W1) einer flusseinschließenden Fläche (S) des SQUID (2) in einer Anordnungsrichtung, in welcher ein Paar von Josephson-Kontakten (3a, 3b), die im SQUID (2) enthalten sind, angeordnet sind, größer ist als ein Abstand (d) zwischen dem Paar der Josephson-Kontakte (3a, 3b).

6. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 1, wobei die Anzahl der Windungen der Zuführspule (5) gleich oder größer als 1 Windung ist, und gleich oder weniger als 6 Windungen ist.

7. Der Hochtemperatur-Supraleiter-Magnet-Sensor (1) gemäß Anspruch 1, welcher ferner einen Kontaktbereich (12, 13, 14, 15, 16) umfasst, welcher die voneinander verschiedenen supraleitenden Lagen (DL, UL) verbindet, wobei, in ebener Ansicht, der Kontaktbereich (12, 13, 14, 15, 16) innerhalb einer Wicklung der Zuführspule (5) und außerhalb der Induktionsspule (4) des SQUID (2) befindlich ist, und die Zuführspule (5) mit der Induktionsspule (4) des SQUID (2) verbindet.

Es folgen 13 Seiten Zeichnungen



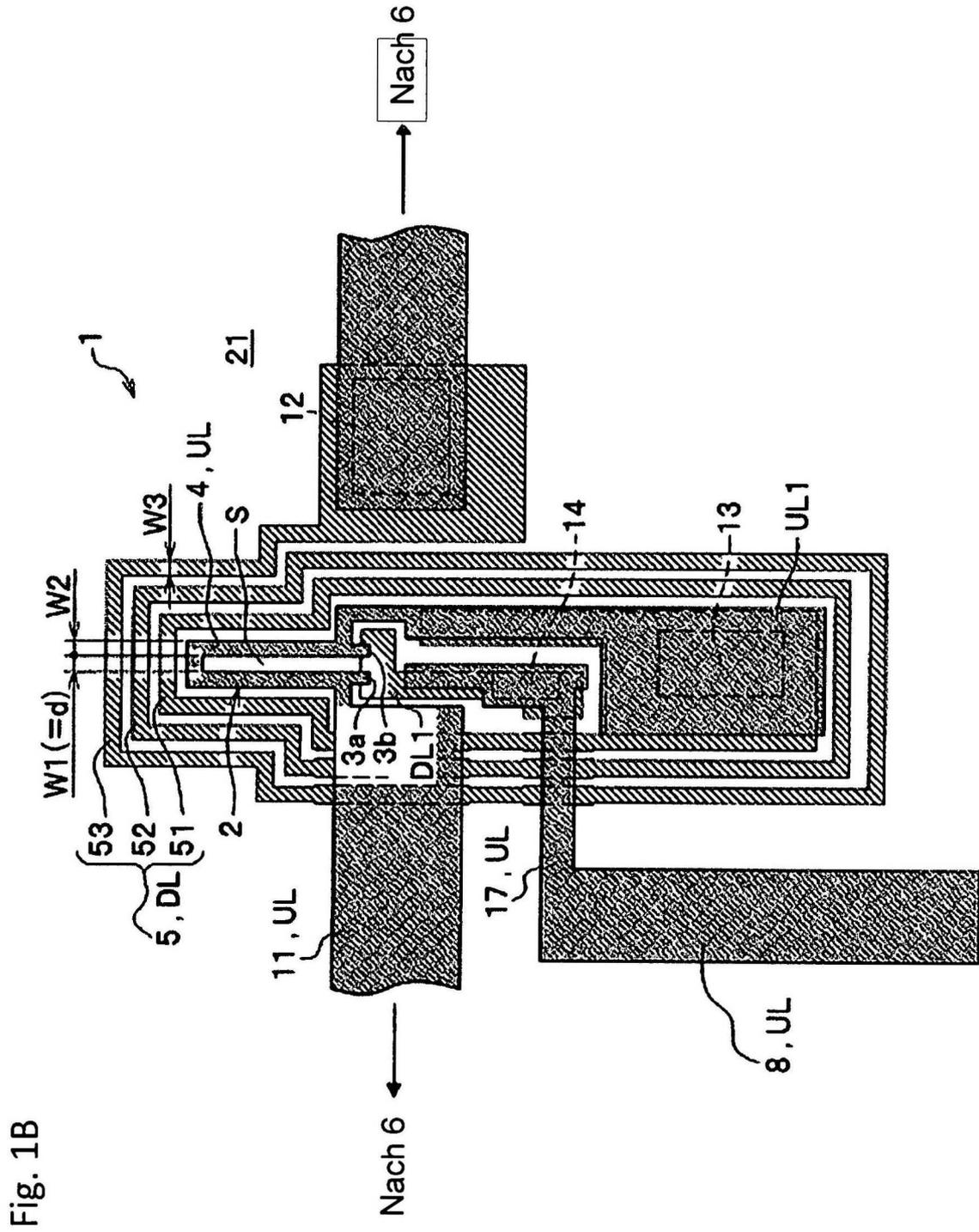


Fig. 1B

FIG.1C

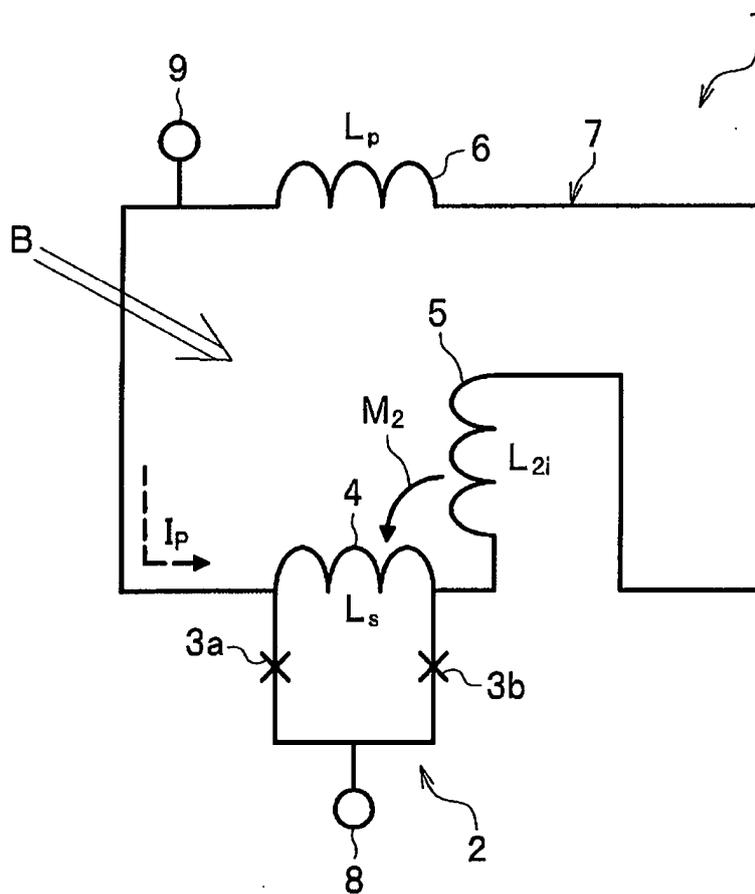






FIG.2C

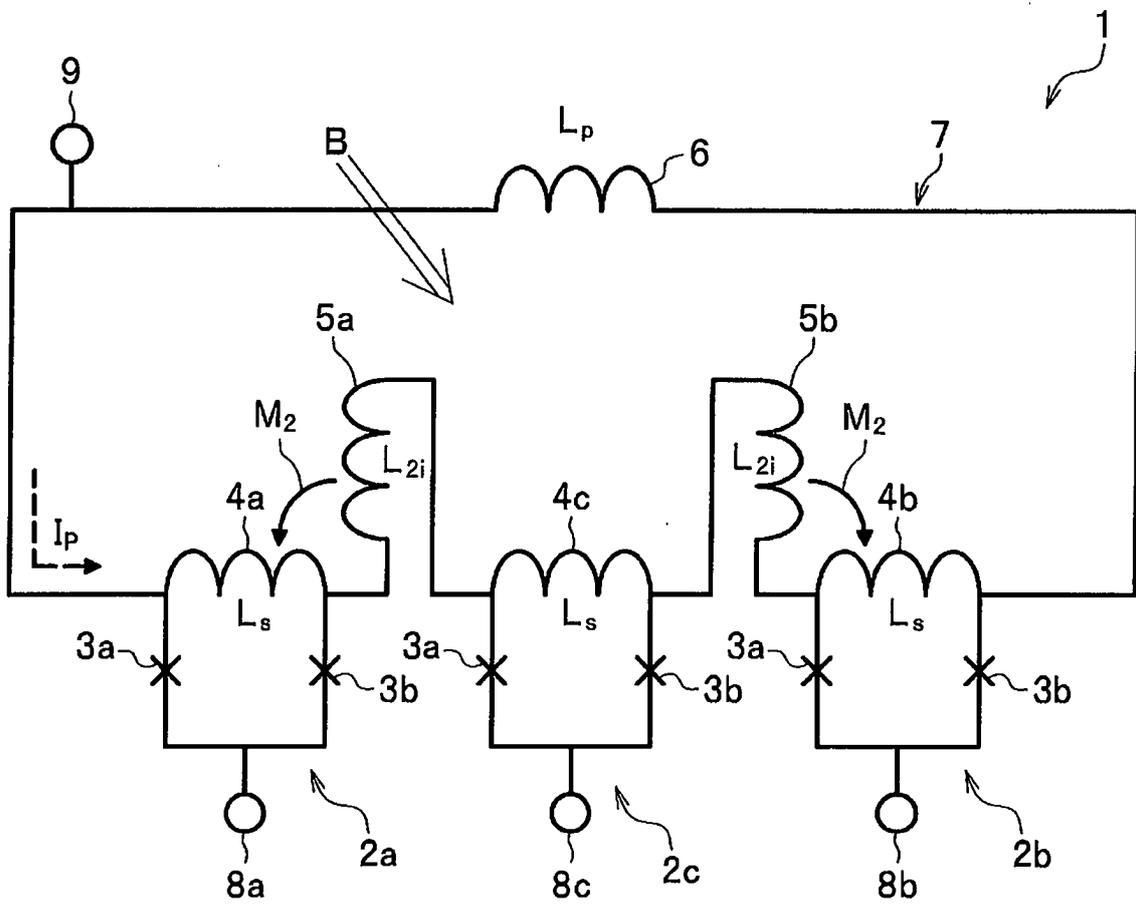


FIG.3A

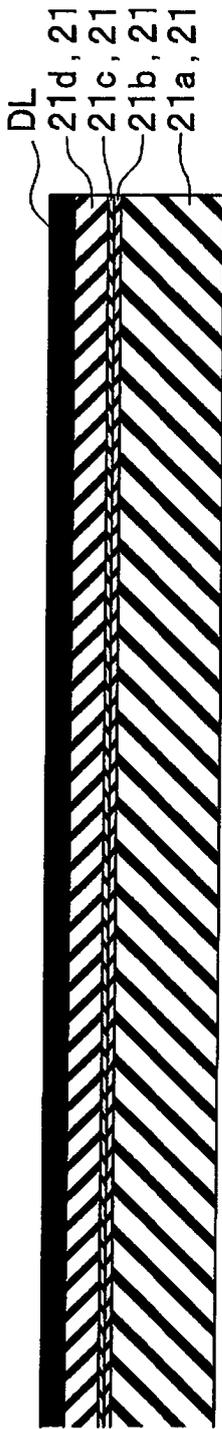


FIG.3B

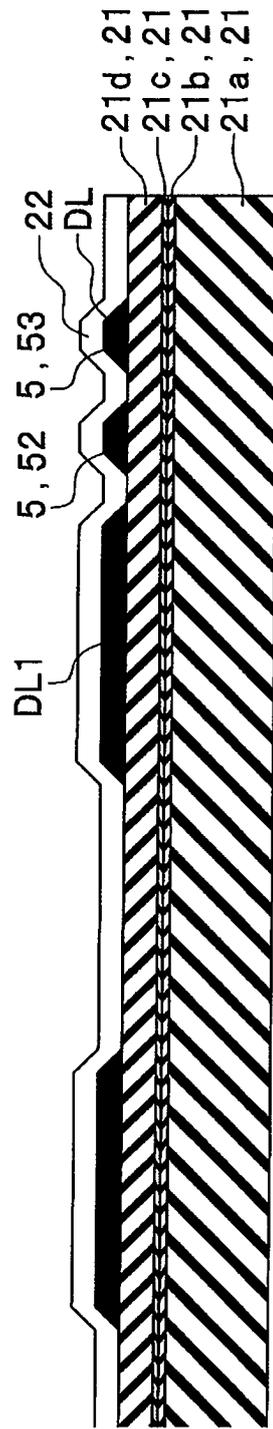


FIG.3C

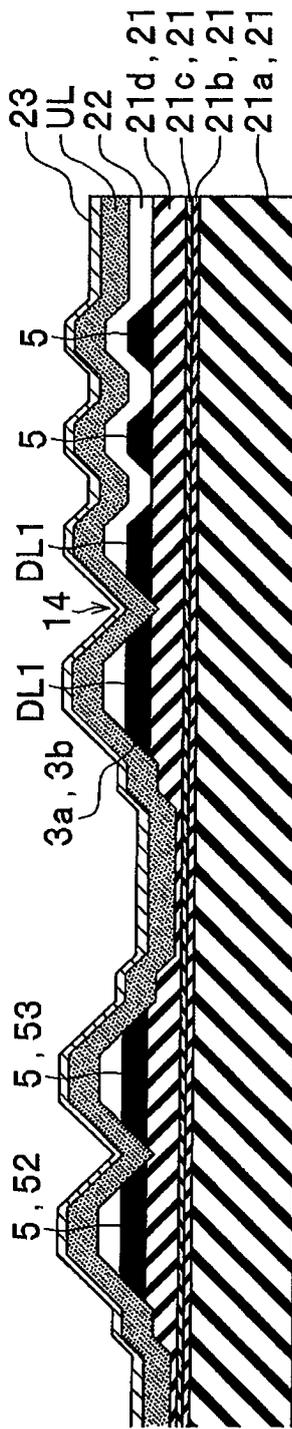
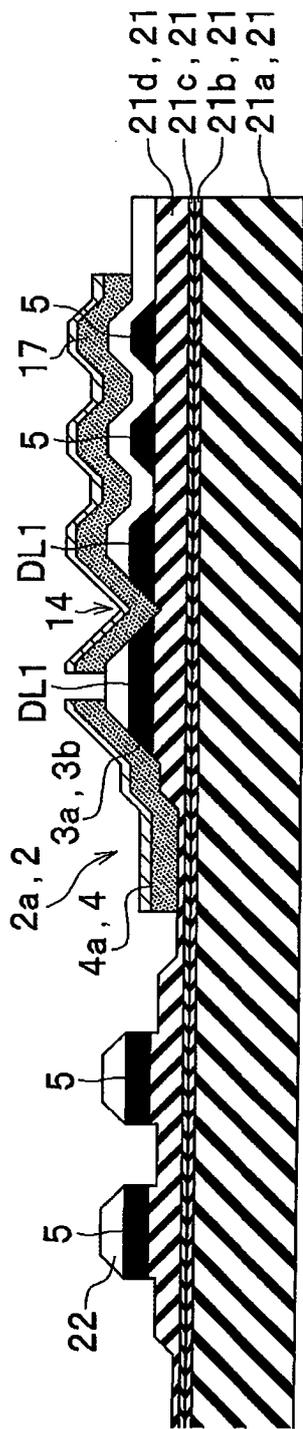
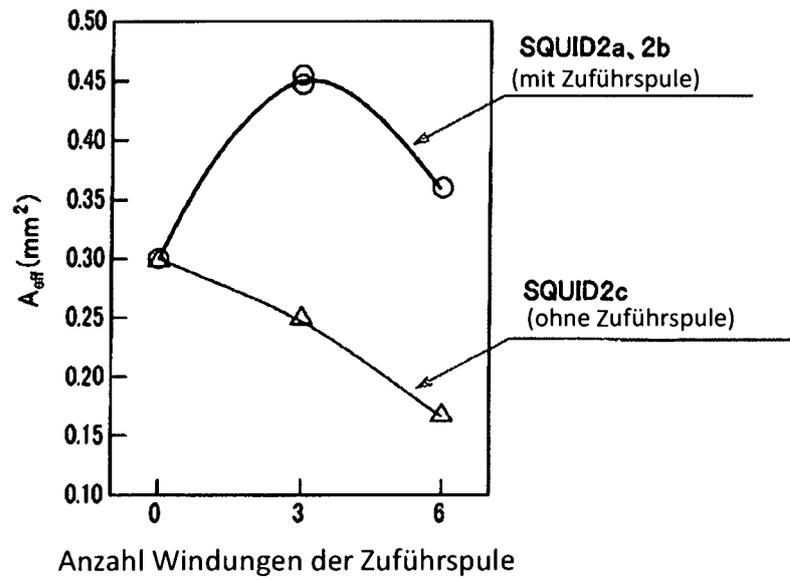


FIG.3D



**FIG.4A**



**FIG.4B**

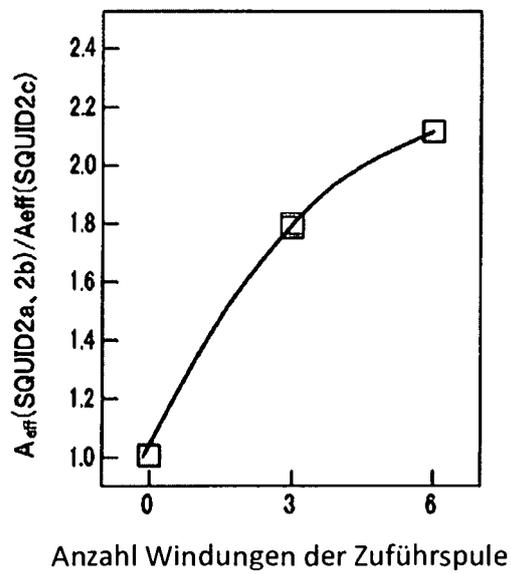


FIG.5

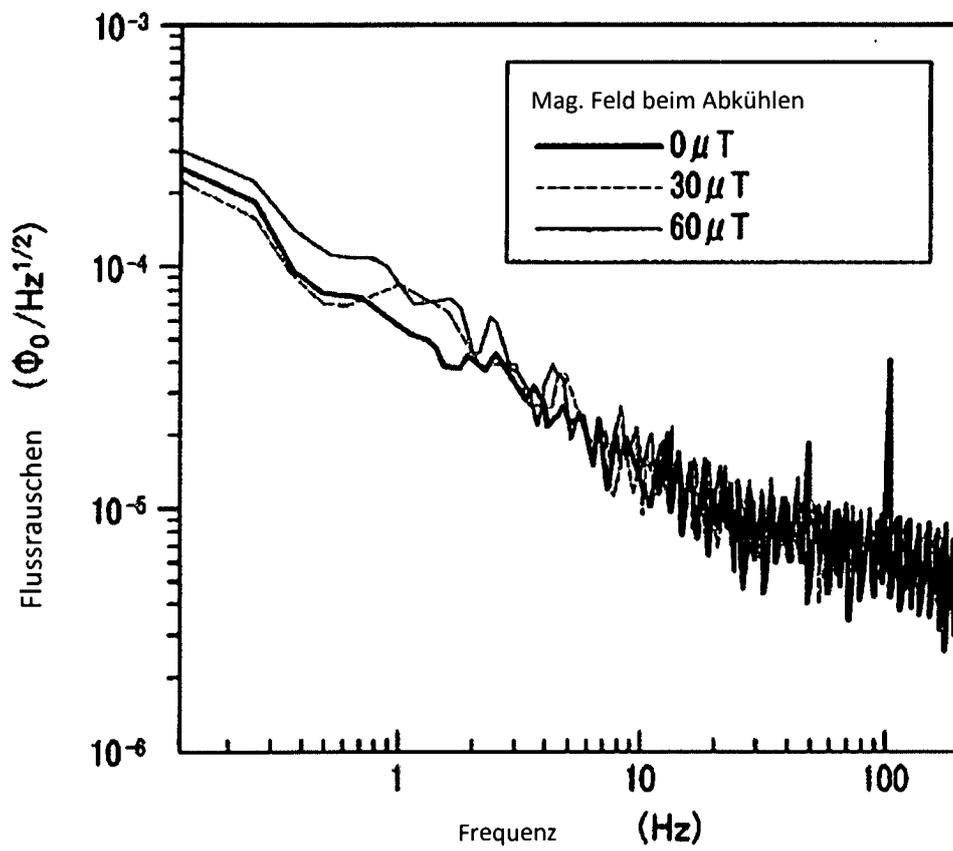


FIG.6A

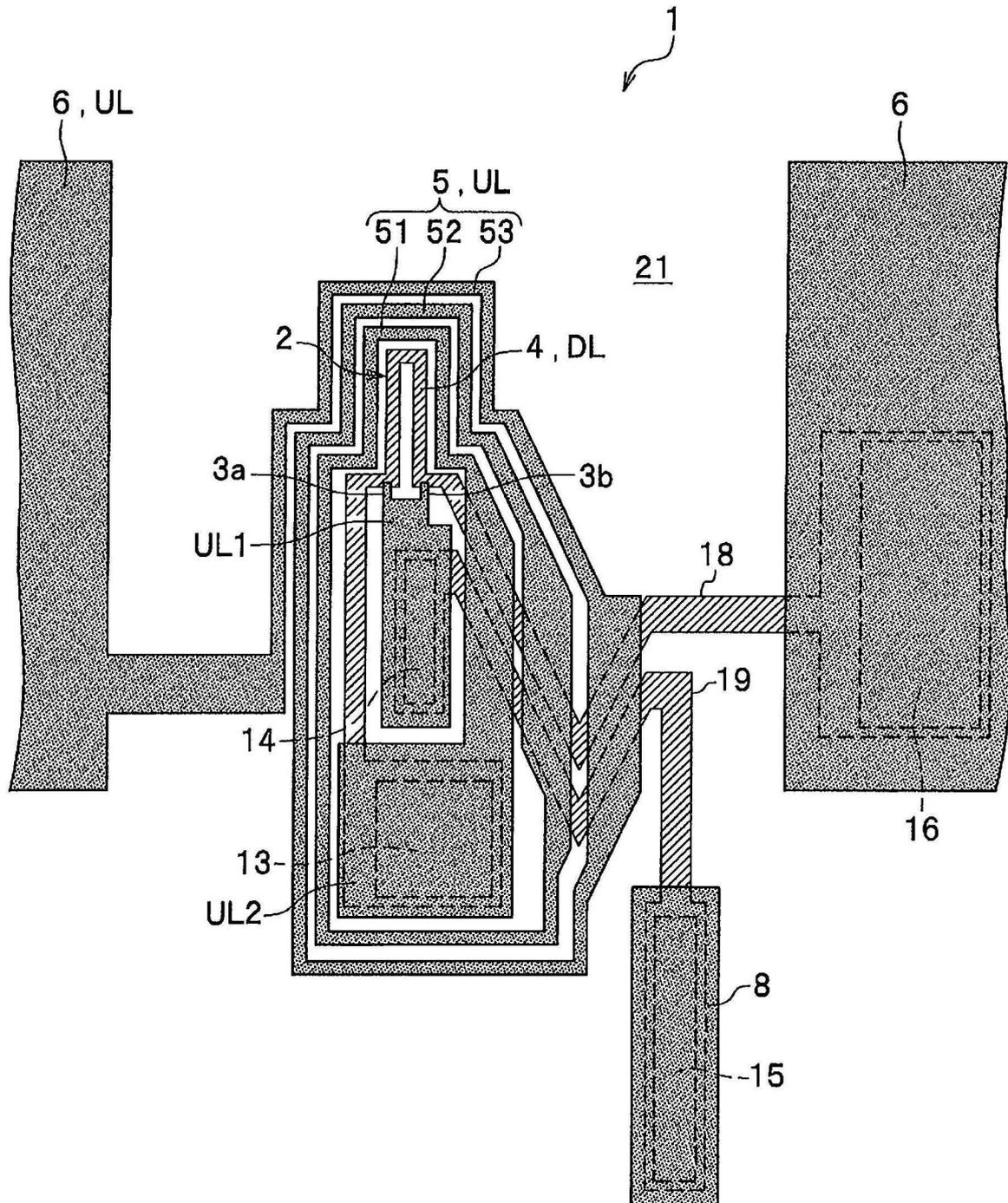




FIG.7

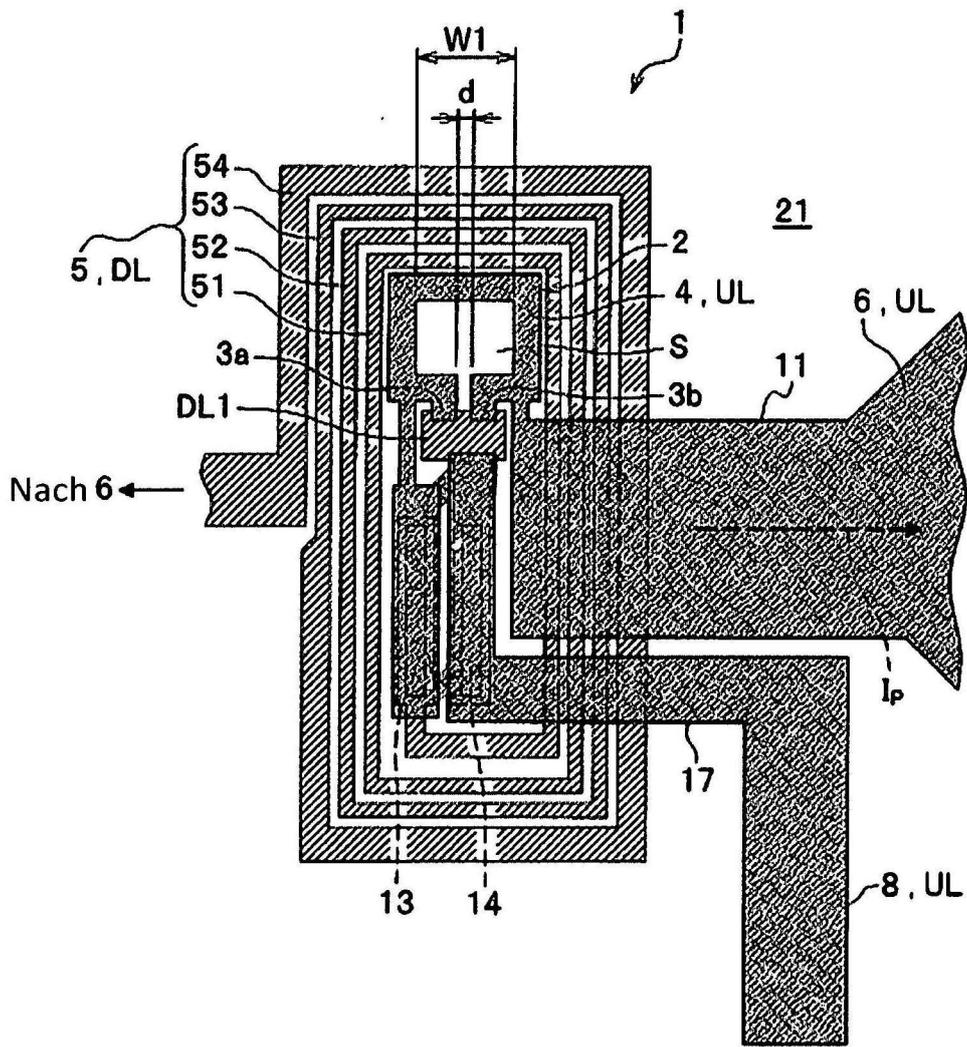


FIG.8

