



(10) **DE 11 2022 004 632 T5** 2024.08.14

(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2023/047727**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜbkG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2022 004 632.5**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2022/024880**
(86) PCT-Anmeldetag: **22.06.2022**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **30.03.2023**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **14.08.2024**

(51) Int Cl.: **H01B 12/06** (2006.01)
H01R 4/68 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2021-156923 **27.09.2021** **JP**

(71) Anmelder:
SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD., Osaka,
JP

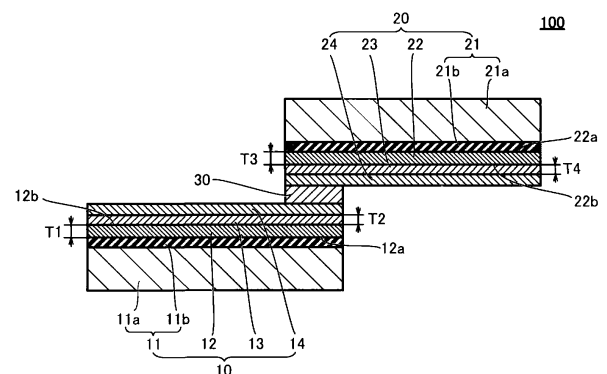
(74) Vertreter:
Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG mbB,
80802 München, DE

(72) Erfinder:
Yamaguchi, Takashi, Osaka-shi, JP

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Supraleitender Draht und supraleitende Drahtverbindungsstruktur**

(57) Zusammenfassung: Ein supraleitender Draht umfasst ein Substrat und eine supraleitende Schicht, die auf dem Substrat angeordnet ist. Die supraleitende Schicht hat eine erste Fläche, die dem Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt. Die zweite Fläche hat einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen supraleitenden Draht und eine supraleitende Drahtverbindungsstruktur. Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität auf Basis der am 27. September 2021 eingereichten japanischen Patentanmeldung Nr. 2021- 156 923. Der gesamte Inhalt der japanischen Patentanmeldung ist hier durch Bezugnahme aufgenommen.

Stand der Technik

[0002] Beispielsweise offenbart die japanische Offenlegungsschrift Nr. 2014- 120383 (PTL 1) einen supraleitenden Draht. Der in PTL 1 offenbarte supraleitende Draht umfasst ein Basismaterial, eine Zwischenschicht, eine supraleitende Oxidschicht, eine Schutzschicht und eine Stabilisierungsschicht.

[0003] Die Zwischenschicht ist auf dem Basismaterial angeordnet. Die supraleitende Oxidschicht ist auf der Zwischenschicht angeordnet. Die Schutzschicht ist auf der supraleitenden Oxidschicht angeordnet. Die Stabilisierungsschicht ist auf der Schutzschicht angeordnet. Die supraleitende Oxidschicht hat eine Fläche mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder weniger und einer maximalen Höhe von 60 nm oder weniger.

Zitationsliste

Patentdokumente

[0004] PTL 1: Japanische Offenlegungsschrift Nr. 2014- 120 383

Zusammenfassung der Erfindung

[0005] Ein supraleitender Draht gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst ein Substrat und eine supraleitende Schicht, die auf dem Substrat angeordnet ist. Die supraleitende Schicht weist eine erste Fläche, die dem Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt, auf. Die zweite Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist eine Querschnittsansicht einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100.

Fig. 2 ist eine Querschnittsansicht einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100 gemäß einer Modifikation.

Fig. 3 ist eine schematische Querschnittsansicht zur Veranschaulichung eines Verfahrens zur Messung eines Verbindungswiderstandes zwischen einem ersten supraleitenden Draht 10 und einem zweiten supraleitenden Draht 20.

Fig. 4 ist eine beispielhafte Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100, die durch ein Vierleiterverfahren erhalten wird.

Detaillierte Beschreibung

[Problem, das durch die vorliegende Erfindung gelöst werden soll]

[0006] Bei der Herstellung von supraleitenden Anwendungsgeräten kann eine Vielzahl von supraleitenden Drähten mit einer Lötlegierung oder ähnlichem miteinander verbunden werden. Wenn eine Vielzahl von supraleitenden Drähten, die in PTL 1 offenbart sind, mit Lot oder ähnlichem miteinander verbunden werden, erhöht sich der Verbindungswiderstand.

[0007] Die vorliegende Erfindung wurde im Hinblick auf das zuvor beschriebene Problem des herkömmlichen Standes der Technik erstellt. Genauer gesagt, stellt die vorliegende Erfindung einen supraleitenden Draht bereit, der eine Reduzierung des Verbindungswiderstandes in einer Vielzahl von miteinander verbundenen supraleitenden Drähten ermöglicht.

[Vorteilhafte Wirkung der vorliegenden Erfindung]

[0008] Gemäß dem supraleitenden Draht der vorliegenden Erfindung kann der Verbindungswiderstand in einer Vielzahl von miteinander verbundenen supraleitenden Drähten gesenkt werden.

[Beschreibung der Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung]

[0009] Zunächst werden Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung aufgeführt und beschrieben.

(1) Ein supraleitender Draht gemäß einer Ausführungsform umfasst ein Substrat und eine supraleitende Schicht, die auf dem Substrat angeordnet ist. Die supraleitende Schicht umfasst eine erste Fläche, die dem Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt. Die zweite Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr.

[0010] Gemäß dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (1) kann der Verbindungswiderstand in der Vielzahl der miteinander verbundenen supraleitenden Drähte gesenkt werden.

[0011] (2) In dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (1) kann der Abschnitt der zweiten Fläche eine arithmetische Mittenrauheit von 60 nm oder mehr und eine maximale Höhe von 0,25 µm oder mehr aufweisen.

[0012] (3) Der supraleitende Draht gemäß obigem Punkt (1) oder (2) kann ferner eine Schutzschicht enthalten, die auf der supraleitenden Schicht angeordnet ist. Ein Bestandteilmaterial der Schutzschicht kann Kupfer enthalten.

[0013] Gemäß dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (3) kann das Auftreten eines Verbindungsfehlers in der Vielzahl der miteinander verbundenen supraleitenden Drähte unterdrückt werden.

[0014] (4) Der supraleitende Draht gemäß obigem Punkt (1) oder (2) kann ferner eine Schutzschicht enthalten, die auf der supraleitenden Schicht angeordnet ist. Ein Bestandteilmaterial der Schutzschicht kann Silber enthalten.

[0015] (5) In dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (4) kann die Schutzschicht eine äußerste Schicht des supraleitenden Drahtes bilden. Die Schutzschicht kann eine Dicke von 1,0 µm oder mehr aufweisen.

[0016] Gemäß dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (5) kann die Vielzahl von supraleitenden Drähten leicht mit einer Lötlegierung verbunden werden, und das Auftreten eines Verbindungsfehlers in der Vielzahl von miteinander verbundenen supraleitenden Drähten kann unterdrückt werden.

[0017] (6) Der supraleitende Draht gemäß obigem Punkt (3) oder (4) kann ferner eine Stabilisierungsschicht enthalten, die auf der Schutzschicht angeordnet ist. Ein Bestandteilmaterial der Stabilisierungsschicht kann Kupfer oder eine Kupferlegierung sein.

[0018] Gemäß dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (6) kann das Auftreten eines Verbindungsfehlers in der Vielzahl der miteinander verbundenen supraleitenden Drähte unterdrückt werden.

[0019] (7) In dem supraleitenden Draht gemäß den obigen Punkten (1) bis (6) kann die supraleitende Schicht eine Dicke von 4,5 µm oder weniger aufweisen.

[0020] Gemäß dem supraleitenden Draht gemäß obigem Punkt (7) kann die Dicke des supraleitenden Drahtes reduziert werden und die Kosten für die Herstellung des supraleitenden Drahtes können reduziert werden.

[0021] (8) Ein supraleitender Draht gemäß einer Ausführungsform umfasst einen ersten supraleitenden Draht, einen zweiten supraleitenden Draht und eine Verbindungsschicht. Der erste supraleitende Draht umfasst: ein erstes Substrat; eine erste supraleitende Schicht, die auf dem ersten Substrat angeordnet ist; eine erste Schutzschicht, die auf der ersten supraleitenden Schicht angeordnet ist; und eine erste Stabilisierungsschicht, die auf der ersten Schutzschicht angeordnet ist. Der zweite supraleitende Draht umfasst: ein zweites Substrat; eine zweite supraleitende Schicht, die auf dem zweiten Substrat angeordnet ist; eine zweite Schutzschicht, die auf der zweiten supraleitenden Schicht angeordnet ist; und eine zweite Stabilisierungs-

schicht, die auf der zweiten Schutzschicht angeordnet ist. Die erste supraleitende Schicht hat eine erste Fläche, die dem ersten Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt. Die zweite supraleitende Schicht hat eine dritte Fläche, die dem zweiten Substrat zugewandt ist, und eine vierte Fläche, die der dritten Fläche gegenüberliegt. Die erste Stabilisierungsschicht ist mit der zweiten Stabilisierungsschicht durch die Verbindungsschicht verbunden. Die zweite Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr. Die vierte Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr.

[0022] Gemäß der supraleitenden Verbindungsdraht-Verbindungsstruktur gemäß obigem Punkt (8) kann der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht und dem zweiten supraleitenden Draht gesenkt werden.

[Details der Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung]

[0023] Einzelheiten der Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben, in denen gleiche oder entsprechende Elemente mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet sind, und die gleiche Beschreibung wird nicht wiederholt.

(Struktur einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur gemäß der Ausführungsform)

[0024] Im Folgenden wird eine Konfiguration einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur gemäß einer Ausführungsform beschrieben. Die supraleitende Drahtverbindungsstruktur gemäß der Ausführungsform wird als eine supraleitende Drahtverbindungsstruktur 100 bezeichnet.

[0025] **Fig. 1** ist eine Querschnittsansicht der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100. Wie in **Fig. 1** gezeigt, umfasst die supraleitende Drahtverbindungsstruktur 100 einen ersten supraleitenden Draht 10, einen zweiten supraleitenden Draht 20 und eine Verbindungsschicht 30. Obwohl **Fig. 1** einen ersten supraleitenden Draht 10 und einen zweiten supraleitenden Draht 20 zeigt, kann die jeweilige Anzahl der ersten supraleitenden Drähte 10 und der zweiten supraleitenden Drähte 20 mehr als eins betragen.

[0026] Der erste supraleitende Draht 10 umfasst ein erstes Substrat 11, eine erste supraleitende Schicht 12, eine erste Schutzschicht 13 und eine erste Stabilisierungsschicht 14.

[0027] Das erste Substrat 11 umfasst ein Basismaterial 11a und eine Zwischenschicht 11b. Die Zwischenschicht 11b ist auf dem Basismaterial 11a angeordnet. Bei dem Basismaterial 11a handelt es sich beispielsweise um ein Plattierungsmaterial, bei dem eine Kupferschicht (Cu) und eine Nickelschicht (Ni) auf ein Edelstahlband aufgebracht sind. Bei der Zwischenschicht 11b handelt es sich beispielsweise um eine Schicht, in der eine Schicht aus Ceroxid (CeO₂), eine Schicht aus Yttriumoxid-stabilisiertem Zirkoniumdioxid (YSZ) und eine Schicht aus Yttriumoxid (Y₂O₃) übereinandergeschichtet sind. Die Zwischenschicht 11b wird z. B. durch Magnetronsputtern gebildet.

[0028] Die erste supraleitende Schicht 12 ist auf dem ersten Substrat 11 angeordnet. Genauer gesagt, ist die erste supraleitende Schicht 12 auf der Zwischenschicht 11b angeordnet. Das Bestandteilmaterial, aus dem die erste supraleitende Schicht 12 besteht, ist z. B. REBCO. REBCO ist ein Oxid-Supraleiter, dargestellt durch REBa₂Cu₃O_x. In diesem Fall steht RE für ein Seltenerdelement. Das Seltenerdelement in dem REBCO, das die erste supraleitende Schicht 12 bildet, ist mindestens eines oder mehrere Elemente, die aus der Gruppe bestehend aus Yttrium, Lanthan, Neodym, Samarium, Europium, Gadolinium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Lutetium und Ytterbium ausgewählt sind.

[0029] Die erste supraleitende Schicht 12 wird zum Beispiel durch gepulste Laserabscheidung (PLD) hergestellt. Die erste supraleitende Schicht 12 kann durch metallorganische Abscheidung (MOD), metallorganische chemische Gasphasenabscheidung (MOCVD) oder Vakuumabscheidung gebildet werden.

[0030] Die erste supraleitende Schicht 12 hat eine erste Fläche 12a und eine zweite Fläche 12b. Die erste Fläche 12a ist der Zwischenschicht 11b zugewandt. Die zweite Fläche 12b ist eine der ersten Fläche 12a gegenüberliegende Fläche. Die arithmetische Mittenrauheit (Ra) auf der zweiten Fläche 12b beträgt 20 nm oder mehr. Die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b kann 25 nm oder mehr, 30 nm oder mehr, 40 nm oder mehr, 60 nm oder mehr, 70 nm oder mehr oder 80 nm oder mehr betragen. Die maximale Höhe (Rz) der zweiten Fläche 12b beträgt 0,25 µm oder mehr. Die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b

kann 0,5 µm oder mehr oder 1,0 µm oder mehr betragen. Die Obergrenze der arithmetischen Mittenrauheit der zweiten Fläche 12b und die Obergrenze der maximalen Höhe der zweiten Fläche 12b sind nicht besonders begrenzt. Die arithmetische Mittenrauheit der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b können jeweils in einem Bereich gewählt werden, in dem die erste supraleitende Schicht 12 nicht von der ersten Schutzschicht 13 und der ersten Stabilisierungsschicht 14 freigelegt wird. Die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b sind beispielsweise gleich oder kleiner als die Summe der Dicke der ersten Schutzschicht 13 und der Dicke der ersten Stabilisierungsschicht 14. Obwohl die maximale Höhe auch als maximale Höhenrauheit bezeichnet werden kann, wird in dieser Beschreibung durchgehend die Bezeichnung „maximale Höhe“ verwendet.

[0031] Die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b werden mit einem Lasermikroskop VK-X3050 der Firma KEYENCE CORPORATION gemessen. Die Messbedingungen für die arithmetische Mittenrauheit der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b werden auf der Basis von JIS B 0601:2013 bestimmt. Vor der Messung der arithmetischen Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und der maximalen Höhe der zweiten Fläche 12b werden die erste Schutzschicht 13 und die erste Stabilisierungsschicht 14 mit einer wässrigen Lösung entfernt, die durch Mischen einer Wasserstoffperoxidlösung und einer Ammoniaklösung im Verhältnis 1:1 erhalten wird. Diese Entfernung der ersten Schutzschicht 13 und der ersten Stabilisierungsschicht 14 mit der wässrigen Lösung hat keinen Einfluss auf die Oberflächeneigenschaften der zweiten Fläche 12b.

[0032] Die Positionen in einem Messbereich in Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10, an denen die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe gemessen werden, sind willkürlich gewählt. Dieser Messbereich hat eine Breite von 100 mm in Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10. Aus diesem Messbereich erhält man zwei Querschnittskurven. In der Breitenrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 liegt die Mitte des Messbereichs in der Mitte des ersten supraleitenden Drahtes 10, und die Breite des Messbereichs beträgt 50 Prozent der Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10. Der Mittelwert der aus den beiden Querschnittskurven erhaltenen arithmetischen Mittenrauheiten wird als arithmetische Mittenrauheit der zweiten Fläche 12b definiert, und der Mittelwert der aus den beiden Querschnittskurven erhaltenen maximalen Höhen wird als maximale Höhe der zweiten Fläche 12b definiert. Die beiden Querschnittskurven sind um 5 Prozent oder mehr der Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10 in Breitenrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 voneinander entfernt. Wenn die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b nach der Verbindung mit dem zweiten supraleitenden Draht 20 gemessen werden, befindet sich der oben erwähnte Messbereich an einer Position, deren Abstand von der Verbindungsschicht 30 in Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 100 mm oder weniger beträgt.

[0033] In der gesamten zweiten Fläche 12b müssen die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe nicht 20 nm oder mehr bzw. 0,25 µm oder mehr betragen. Die zweite Fläche 12b sollte nur einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr aufweisen. Genauer gesagt sollten die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b nur 20 nm oder mehr bzw. 0,25 µm oder mehr betragen, und zwar an einer Position, an der die zweite Fläche 12b mit der Verbindungsschicht 30 überlappt, und in der Nähe dieser Position. Die Umgebung der Position, an der sich die zweite Fläche 12b mit der Verbindungsschicht 30 überlappt, ist ein Bereich, dessen Abstand von der Verbindungsschicht 30 in der Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 100 mm oder weniger beträgt.

[0034] Wenn die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b 60 nm oder mehr beträgt, kann die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b weniger als 0,25 µm betragen.

[0035] Die Dicke der ersten supraleitenden Schicht 12 ist als eine Dicke T1 definiert. Die Dicke T1 beträgt vorzugsweise 4,5 µm oder weniger.

[0036] In der Kupferschicht des Basismaterials 11a sind die Kristallkörner ausgerichtet. Daher sind die Kristallkörner auch in der Nickelschicht des Basismaterials 11a und der Zwischenschicht 11b ausgerichtet. Infolgedessen sind die Kristallkörner im REBCO in der ersten supraleitenden Schicht 12 biaxial ausgerichtet. Mit anderen Worten, eine a-Achse und eine c-Achse des REBCO in der ersten supraleitenden Schicht 12 erstrecken sich jeweils in der Richtung orthogonal zur Normalen auf die zweite Fläche 12b und in der Richtung der Normalen auf die zweite Fläche 12b.

[0037] Das erste Substrat 11 ist nicht auf das zuvor beschriebene Beispiel beschränkt. Das Basismaterial 11a kann ein Band aus Hastelloy (eingetragenes Warenzeichen) sein, und die Zwischenschicht 11b kann auf diesem Band durch ionenstrahlunterstützte Abscheidung (IBAD) gebildet werden.

[0038] Es ist zu beachten, dass die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b durch geeignete Änderung des Typs des ersten Substrats 11, der Dicke T1, des Filmbildungsverfahrens für die erste supraleitende Schicht 12, der Filmbildungstemperatur für die erste supraleitende Schicht 12 und dergleichen angepasst werden können. Beispielsweise führt die Herstellung der ersten supraleitenden Schicht 12 durch MOD zu einer geringeren arithmetischen Mittenrauheit und einer geringeren maximalen Höhe der zweiten Fläche 12b. Die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b können teilweise durch Änderung der oben genannten Bedingungen in Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 verändert werden. Genauer gesagt können die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b nur in dem Abschnitt teilweise verändert werden, der für die Verbindung mit dem zweiten supraleitenden Draht 20 durch die Verbindungsschicht 30 vorgesehen ist. Wenn die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b im Wesentlichen gleichmäßig in der Längsrichtung des ersten supraleitenden Drahtes 10 sind, können die Herstellungsbedingungen leicht gesteuert werden, und somit können die Kosten für die Herstellung des ersten supraleitenden Drahtes 10 reduziert werden.

[0039] Das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Schutzschicht 13 gebildet ist, enthält beispielsweise Silber (Ag). Das Bestandteilmaterial der ersten Schutzschicht 13 kann Kupfer enthalten. Das Hauptmaterial des Bestandteilmaterials der ersten Schutzschicht 13 kann Silber oder Kupfer sein. Das Hauptmaterial ist ein Bestandteilmaterial, das 50 Massenprozent oder mehr des Bestandteilmaterials ausmacht. Die erste Schutzschicht 13 wird z. B. durch Sputtern hergestellt. Die erste Schutzschicht 13 ist auf der ersten supraleitenden Schicht 12 angeordnet. Die Dicke der ersten Schutzschicht 13 ist als Dicke T2 definiert. Wenn das Bestandteilmaterial der ersten Schutzschicht 13 Silber ist, kann die Dicke T2 1,0 µm oder mehr oder weniger als 1,0 µm betragen.

[0040] Das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Stabilisierungsschicht 14 gebildet ist, enthält z. B. Kupfer. Das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Stabilisierungsschicht 14 gebildet ist, kann eine Kupferlegierung sein. Das Hauptmaterial des Bestandteilmaterials der ersten Stabilisierungsschicht 14 kann Kupfer sein. Die erste Stabilisierungsschicht 14 ist auf der ersten Schutzschicht 13 angeordnet. Die erste Stabilisierungsschicht 14 wird z.B. durch Plattieren gebildet.

[0041] Der zweite supraleitende Draht 20 umfasst ein zweites Substrat 21, eine zweite supraleitende Schicht 22, eine zweite Schutzschicht 23 und eine zweite Stabilisierungsschicht 24.

[0042] Das zweite Substrat 21 umfasst ein Basismaterial 21a und eine Zwischenschicht 21b. Die Zwischenschicht 21b ist auf dem Basismaterial 21a angeordnet. Bei dem Basismaterial 21a handelt es sich beispielsweise um ein Plattierungsmaterial, bei dem eine Kupferschicht und eine Nickelschicht auf ein Edelstahlband aufgebracht sind. Bei der Zwischenschicht 21b handelt es sich beispielsweise um eine Schicht, in der eine Schicht aus Ceroxid, eine Schicht aus Yttriumoxid-stabilisiertem Zirkoniumdioxid und eine Schicht aus Yttriumoxid übereinander angeordnet sind. Die Zwischenschicht 21b wird z. B. durch Magnetronsputtern hergestellt.

[0043] Die zweite supraleitende Schicht 22 ist auf dem zweiten Substrat 21 angeordnet. Genauer gesagt, ist die zweite supraleitende Schicht 22 auf der Zwischenschicht 21b angeordnet. Das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite supraleitende Schicht 22 gebildet ist, ist z. B. REBCO. Das Seltenerdelement im REBCO, aus dem die zweite supraleitende Schicht 22 besteht, ist mindestens eines oder mehrere Elemente aus der Gruppe bestehend aus Yttrium, Lanthan, Neodym, Samarium, Europium, Gadolinium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Lutetium und Ytterbium.

[0044] Die zweite supraleitende Schicht 22 wird z. B. durch PLD hergestellt. Die zweite supraleitende Schicht 22 kann durch MOD-, MOCVD- oder Vakuumabscheidung gebildet werden.

[0045] Die zweite supraleitende Schicht 22 weist eine dritte Fläche 22a und eine vierte Fläche 22b auf. Die dritte Fläche 22a ist der Zwischenschicht 21b zugewandt. Die vierte Fläche 22b ist eine der dritten Fläche 22a gegenüberliegende Fläche. Die arithmetische Mittenrauheit auf der vierten Fläche 22b beträgt 20 nm oder mehr. Die arithmetische Mittenrauheit auf der vierten Fläche 22b kann 25 nm oder mehr, 30 nm oder mehr, 40 nm oder mehr, 60 nm oder mehr, 70 nm oder mehr oder 80 nm oder mehr betragen.

[0046] Die maximale Höhe der vierten Fläche 22b beträgt 0,25 µm oder mehr. Die maximale Höhe der vierten Fläche 22b kann 0,5 µm oder mehr oder 1,0 µm oder mehr betragen. Die Obergrenze der arithmetischen Mittenrauheit der vierten Fläche 22b und die Obergrenze der maximalen Höhe der vierten Fläche 22b sind nicht besonders begrenzt. Die arithmetische Mittenrauheit der vierten Fläche 22b und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b können jeweils in einem Bereich gewählt werden, in dem die zweite supraleitende Schicht 22 nicht von der zweiten Schutzschicht 23 und der zweiten Stabilisierungsschicht 24 freigelegt wird. Die arithmetische Mittenrauheit auf der vierten Fläche 22b und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b sind beispielsweise gleich oder kleiner als die Summe der Dicke der zweiten Schutzschicht 23 und der Dicke der zweiten Stabilisierungsschicht 24. Es ist zu beachten, dass die arithmetische Mittenrauheit der vierten Fläche 22b und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b jeweils nach denselben Verfahren gemessen werden wie die arithmetische Mittenrauheit der zweiten Fläche 12b und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b.

[0047] Auf der gesamten vierten Fläche 22b müssen die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe nicht 20 nm oder mehr bzw. 0,25 µm oder mehr betragen. Die vierte Fläche 22b sollte nur einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 µm oder mehr aufweisen. Genauer gesagt sollten die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b nur 20 nm oder mehr bzw. 0,25 µm oder mehr an einer Position betragen, an der die vierte Fläche 22b mit der Verbindungsschicht 30 überlappt.

[0048] Wenn die arithmetische Mittenrauheit auf der vierten Fläche 22b 60 nm oder mehr beträgt, kann die maximale Höhe der vierten Fläche 22b weniger als 0,25 µm betragen.

[0049] Die Dicke der zweiten supraleitenden Schicht 22 ist als eine Dicke T3 definiert. Die Dicke T3 beträgt vorzugsweise 4,5 µm oder weniger.

[0050] In der Kupferschicht des Basismaterials 21a sind die Kristallkörner ausgerichtet. Daher sind die Kristallkörner auch in der Nickelschicht des Basismaterials 21a und der Zwischenschicht 21b ausgerichtet. Infolgedessen sind die Kristallkörner im REBCO der zweiten supraleitenden Schicht 22 biaxial ausgerichtet. Mit anderen Worten, eine a-Achse und eine c-Achse des REBCO in der zweiten supraleitenden Schicht 22 erstrecken sich jeweils in der Richtung orthogonal zur Normalen auf die vierte Fläche 22b und in der Richtung der Normalen auf die vierte Fläche 22b.

[0051] Das zweite Substrat 21 ist nicht auf das zuvor beschriebene Beispiel beschränkt. Das Basismaterial 21a kann ein Band aus Hastelloy (eingetragenes Warenzeichen) sein, und die Zwischenschicht 21b kann auf diesem Band durch IBAD gebildet werden.

[0052] Es ist zu beachten, dass die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b durch geeignete Änderung des Typs des zweiten Substrats 21, der Dicke T3, des Filmbildungsverfahrens für die zweite supraleitende Schicht 22, der Filmbildungstemperatur für die zweite supraleitende Schicht 22 und dergleichen angepasst werden können. Beispielsweise führt die Herstellung der zweiten supraleitenden Schicht 22 durch MOD zu einer geringeren arithmetischen Mittenrauheit und einer geringeren maximalen Höhe der vierten Fläche 22b. Die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b können teilweise durch Änderung der zuvor genannten Bedingungen in Längsrichtung des zweiten supraleitenden Drahtes 20 verändert werden. Genauer gesagt können die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b nur in dem Abschnitt teilweise verändert werden, der für die Verbindung mit dem ersten supraleitenden Draht 10 durch die Verbindungsschicht 30 vorgesehen ist. Wenn die arithmetische Mittenrauheit und die maximale Höhe der vierten Fläche 22b im Wesentlichen gleichmäßig in der Längsrichtung des zweiten supraleitenden Drahtes 20 sind, können die Herstellungsbedingungen leicht gesteuert werden, und somit können die Kosten für die Herstellung des zweiten supraleitenden Drahtes 20 reduziert werden.

[0053] Das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite Schutzschicht 23 gebildet ist, enthält z.B. Silber. Das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite Schutzschicht 23 gebildet ist, kann Kupfer enthalten. Das Hauptmaterial des Bestandteilmaterials der zweiten Schutzschicht 23 kann Silber oder Kupfer sein. Die zweite Schutzschicht 23 wird z. B. durch Sputtern hergestellt. Die zweite Schutzschicht 23 ist auf der zweiten supraleitenden Schicht 22 angeordnet. Die Dicke der zweiten Schutzschicht 23 ist als Dicke T4 definiert. Wenn die zweite Schutzschicht 23 aus Silber besteht, kann die Dicke T4 1,0 µm oder mehr oder weniger als 1,0 µm betragen.

[0054] Das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite Stabilisierungsschicht 24 gebildet ist, enthält zum Beispiel Kupfer. Das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite Stabilisierungsschicht 24 gebildet ist, kann eine Kupferlegierung sein. Das Hauptmaterial des Bestandteilmaterials der zweiten Stabilisierungsschicht 24 kann Kupfer sein. Die zweite Stabilisierungsschicht 24 ist auf der zweiten Schutzschicht 23 angeordnet. Die zweite Stabilisierungsschicht 24 wird z.B. durch Plattieren gebildet.

[0055] Fig. 2 ist eine Querschnittsansicht einer supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100 gemäß einer Modifikation. Wie in Fig. 2 gezeigt, muss der erste supraleitende Draht 10 keine erste Stabilisierungsschicht 14 enthalten, und der zweite supraleitende Draht 20 muss keine zweite Stabilisierungsschicht 24 enthalten. Mit anderen Worten, die erste Schutzschicht 13 kann eine äußerste Schicht im ersten supraleitenden Draht 10 sein, und die zweite Schutzschicht 23 kann eine äußerste Schicht im zweiten supraleitenden Draht 20 sein. In diesem Fall betragen die Dicken T2 und T4 jeweils vorzugsweise 1,0 μm oder mehr.

[0056] Wie in Fig. 1 gezeigt, ist der erste supraleitende Draht 10 so angeordnet, dass er sich zumindest teilweise mit dem zweiten supraleitenden Draht 20 überlappt. Die erste Stabilisierungsschicht 14 liegt zumindest teilweise der zweiten Stabilisierungsschicht 24 gegenüber. Genauer gesagt liegt die erste Stabilisierungsschicht 14 am Längsende des ersten supraleitenden Drahtes 10 der zweiten Stabilisierungsschicht 24 am Längsende des zweiten supraleitenden Drahtes 20 gegenüber.

[0057] Die Verbindungsschicht 30 ist beispielsweise eine Lötlegierung wie eine Zinn (Sn)-Legierung. Die Verbindungsschicht 30 ist zwischen der ersten Stabilisierungsschicht 14 und der zweiten Stabilisierungsschicht 24 angeordnet, die einander gegenüberliegen, um dadurch die erste Stabilisierungsschicht 14 und die zweite Stabilisierungsschicht 24 zu verbinden. Somit sind die erste supraleitende Schicht 12 und die zweite supraleitende Schicht 22 in einem normalleitenden Zustand verbunden.

[0058] Wie in Fig. 2 gezeigt, ist, wenn der erste supraleitende Draht 10 keine erste Stabilisierungsschicht 14 und der zweite supraleitende Draht 20 keine zweite Stabilisierungsschicht 24 aufweist, die Verbindungsschicht 30 zwischen der ersten Schutzschicht 13 und der zweiten Schutzschicht 23 angeordnet, die einander gegenüberliegen, um so die erste Schutzschicht 13 und die zweite Schutzschicht 23 zu verbinden.

[0059] Der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 beträgt vorzugsweise 200 $\text{n}\Omega\cdot\text{cm}^2$ oder weniger. Es sollte beachtet werden, dass der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 ein Wert ist, der erhalten wird, indem der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 mit der Fläche der Verbindung zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 multipliziert wird. Es werden drei Proben hergestellt, von denen jede durch Verbinden des ersten supraleitenden Drahts 10 und des zweiten supraleitenden Drahts 20 durch die Verbindungsschicht 30 erhalten wird, und außerdem wird der Durchschnittswert der für die jeweiligen Proben gemessenen Verbindungswiderstände als Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 definiert. Der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 wird mit einem Vierleiterverfahren gemessen.

[0060] Fig. 3 ist eine schematische Querschnittsansicht zur Veranschaulichung eines Verfahrens zur Messung eines Verbindungswiderstandes zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20. Fig. 4 ist eine beispielhafte Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100, die durch ein Vierleiterverfahren erhalten wird. Wie in Fig. 3 gezeigt, werden bei der Messung des Verbindungswiderstandes zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 erstens ein erster Anschluss und ein zweiter Anschluss, die mit einer Stromversorgung verbunden sind, mit jeweils der ersten Stabilisierungsschicht 14 und der zweiten Stabilisierungsschicht 24 verbunden. Zweitens sind ein dritter Anschluss und ein vierter Anschluss, die mit einem Spannungsmesser verbunden sind, jeweils mit der ersten Stabilisierungsschicht 14 und der zweiten Stabilisierungsschicht 24 verbunden. Die Position, an der der dritte Anschluss angeschlossen ist, liegt näher an dem Verbindungsabschnitt zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 als die Position, an der der erste Anschluss angeschlossen ist, und die Position, an der der vierte Anschluss angeschlossen ist, liegt näher an dem Verbindungsabschnitt zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 als die Position, an der der zweite Anschluss angeschlossen ist. Das zuvor erwähnte Voltmeter ist z.B. das 2182A NANOVOLTMETER von KEITHLEY.

[0061] Drittens misst das Voltmeter in dem Zustand, in dem die supraleitende Drahtverbindungsstruktur 100 durch flüssigen Stickstoff auf 77 Kelvin abgekühlt ist, und während die Stromversorgung den zwischen dem ersten Anschluss und dem zweiten Anschluss fließenden Strom ändert, die Spannung zwischen dem dritten Anschluss und dem vierten Anschluss. Daraus ergibt sich eine Strom-Spannungs-Kennlinie, die in **Fig. 4** dargestellt ist. Die Steigung der Strom-Spannungs-Kennlinie wird auf der Grundlage der erhaltenen Strom-Spannungs-Kennlinie berechnet. Diese Steigung stellt einen Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 dar. Viertens wird durch Multiplikation dieses Verbindungswiderstands mit der Verbindungsfläche zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 erhalten. Die Verbindungsfläche zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 ist eine Fläche, in der der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 durch die Verbindungsschicht 30 verbunden sind. Wenn der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 die gleiche Breite aufweisen und der erste supraleitende Draht und der zweite supraleitende Draht 20 durch die Verbindungsschicht 30 in der gesamten Breitenrichtung verbunden sind, ist der Verbindungsbereich zwischen dem ersten supraleitenden Draht und dem zweiten supraleitenden Draht 20 das Produkt aus der Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10 (des zweiten supraleitenden Drahtes 20) und der Verbindungslänge. Die Verbindungslänge ist die Länge eines Abschnitts des ersten supraleitenden Drahtes 10 (zweiten supraleitenden Drahtes 20), entlang dessen er durch die Verbindungsschicht 30 verbunden ist. Wenn die Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10 oder des zweiten supraleitenden Drahtes 20 kleiner ist als die Breite des anderen der beiden Drähte, ist die Verbindungsfläche das Produkt aus der Verbindungslänge und der kleineren Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10 oder des zweiten supraleitenden Drahtes 20. Wenn der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 jeweils keine erste Stabilisierungsschicht 14 und zweite Stabilisierungsschicht 24 aufweisen, sind der erste Anschluss und der dritte Anschluss mit der ersten Schutzschicht 13 verbunden, während der zweite Anschluss und der vierte Anschluss mit der zweiten Schutzschicht 23 verbunden sind. Die zuvor erwähnte Verbindungslänge, die von den Breiten des ersten supraleitenden Drahtes 10 und des zweiten supraleitenden Drahtes 20 abhängt, beträgt beispielsweise 0,5 cm oder mehr und 10 cm oder weniger. Ferner beträgt die Breite des ersten supraleitenden Drahtes 10 und des zweiten supraleitenden Drahtes 20 beispielsweise 0,3 mm oder mehr und 5 mm oder weniger.

(Effekte der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur gemäß der Ausführungsform)

[0062] Die Auswirkungen der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100 werden im Folgenden beschrieben.

[0063] Das Ergebnis intensiver Studien des vorliegenden Erfinders zeigt, dass eine kleinere arithmetische Mittenrauheit und eine kleinere maximale Höhe der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b zu einem höheren Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 in dem Zustand führen, in dem der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 durch die Verbindungsschicht 30 verbunden sind.

[0064] In der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100 beträgt die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils 20 nm oder mehr, und die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b beträgt jeweils 0,25 μm oder mehr. Somit kann gemäß der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur 100 der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 gesenkt werden.

[0065] Wenn der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 mit einer Lötlegierung verbunden werden, löst sich die äußerste Schicht des ersten supraleitenden Drahtes 10 und des zweiten supraleitenden Drahtes 20 in der geschmolzenen Lötlegierung auf. Wenn diese Auflösung fortschreitet und die geschmolzene Lötlegierung die zweite Fläche 12b und die vierte Fläche 22b erreicht, kann die Verbindung zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 nicht hergestellt werden.

[0066] Wenn das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Stabilisierungsschicht 14 gebildet ist, Kupfer oder eine Kupferlegierung ist, enthält die äußerste Schicht des ersten supraleitenden Drahtes 10 Kupfer als Hauptbestandteil. Wenn das Bestandteilmaterial, aus dem die zweite Stabilisierungsschicht 24 gebildet ist, Kupfer oder eine Kupferlegierung ist, enthält die äußerste Schicht des zweiten supraleitenden Drahtes 20 Kupfer als Hauptbestandteil. Kupfer löst sich in der geschmolzenen Lötlegierung weniger leicht auf als Silber.

[0067] Somit kann in dem Fall, in dem das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Stabilisierungsschicht 14 und die zweite Stabilisierungsschicht 24 gebildet sind, Kupfer oder eine Kupferlegierung ist, das Auftreten eines Verbindungsfehlers aufgrund der zuvor erwähnten Auflösung unterdrückt werden. In dem Fall, in dem das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Schutzschicht 13 und die zweite Schutzschicht 23 gebildet sind, Kupfer enthält, schreitet die oben erwähnte Auflösung noch weniger leicht voran.

[0068] Wenn das Bestandteilmaterial, aus dem die äußerste Schicht des ersten supraleitenden Drahtes 10 und des zweiten supraleitenden Drahtes 20 gebildet sind, Silber enthält, d.h. wenn der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 keine erste Stabilisierungsschicht 14 bzw. zweite Stabilisierungsschicht 24 aufweisen, und das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Schutzschicht 13 und die zweite Schutzschicht 23 gebildet sind, Silber enthält, ist eine Verbindung mit einer Lötlegierung leicht möglich. Andererseits löst sich Silber leicht in der geschmolzenen Lötlegierung, und dementsprechend gelangt die geschmolzene Lötlegierung in die Nähe der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22, wenn die Dicken T2 und T4 klein sind. Die geschmolzene Lötlegierung, die in die Nähe der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22 gelangt, verringert die Haftung der Lötlegierung an der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22, was zu einem Verbindungsfehler führen kann. Betragen die Dicken T2 und T4 1 µm oder mehr, ist es möglich, das Auftreten eines Verbindungsfehlers aufgrund der oben erwähnten Auflösung zu unterdrücken.

[0069] Wenn die Dicken T1 und T3 jeweils 4,5 µm oder weniger betragen, können der erste supraleitende Draht 10 und der zweite supraleitende Draht 20 in ihrer Dicke reduziert werden. In diesem Fall können die Kosten für die Herstellung des ersten supraleitenden Drahtes 10 und des zweiten supraleitenden Drahtes 20 reduziert werden.

(Erster Test)

[0070] Im Folgenden wird ein erster Test beschrieben.

[0071] In dem ersten Test wurden die Proben 1 bis 19 jeweils als eine Probe der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur hergestellt. In den Proben 1 bis 19 wurden die Typen des ersten Substrats 11 und des zweiten Substrats 21, das Filmbildungsverfahren für die erste supraleitende Schicht 12 und die zweite supraleitende Schicht 22, die Dicken T1 und T3, die arithmetische Mittenrauheit auf jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b, die maximale Höhe jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b und die Verbindungslänge geändert. Die Einzelheiten der Proben 1 bis 19 sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt. In den Proben 1 bis 19 war das Bestandteilmaterial der ersten Schutzschicht 13 und der zweiten Schutzschicht 23 jeweils Silber und das Bestandteilmaterial der ersten Stabilisierungsschicht 14 und der zweiten Stabilisierungsschicht 24 jeweils Kupfer. In den Proben 1 bis 19 betrug die Breite der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22 jeweils 4 mm, und der Wert, der sich aus der Multiplikation dieser Breite mit jeder der in den Tabellen 1 und 2 angegebenen Verbindungslängen ergibt, wurde als Verbindungsfläche definiert, die zur Berechnung des Verbindungswiderstandes verwendet wird.

[Tabelle 1]

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Typen des ersten Substrats 11 und zweiten Substrats 21	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	IBAD	IBAD	IBAD
Filmbildungsverfahren für erste supraleitende Schicht 12 und zweite supraleitende Schicht 22	PLD	PLD	PLD	MOD	MOD	MOD	Vakuumbeschichtung	Vakuumbeschichtung	Vakuumbeschichtung
Dicke T1 und Dicke T3 (µm)	4	4	4	4	4	4	3	3	3
Ra der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	160	160	160	80	50	80	90	70	90
Rz der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (µm)	3,2	8,9	3,9	1,2	1,2	0,90	1,1	1,0	1,1
Verbindungsgröße (cm)	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Verbindungsgrößenstand (nΩ·cm ²)	38	46	41	75	110	85	70	90	85

[Tabelle2]

Probe	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Typen des ersten Substrats 11 und zweiten Substrats 12	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD	IBAD
Filmbildungsverfahren für erste supraleitende Schicht 12 und zweite supraleitende Schicht 22	PLD	PLD	PLD	Vakuumb-scheidung	Vakuumb-scheidung	PLD	MOD	MOD	MOD	MOD
Dicke T1 und Dicke T3 (µm)	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2
Ra der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	80	100	90	30	40	50	30	20	10	20
Rz der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (µm)	0,85	1,3	1,4	0,43	0,51	1,0	0,53	0,16	0,22	0,25
Verbindungslänge (cm)	1	5	10	1	5	10	5	1	5	10
Verbindungs-widerstand (nΩ·cm²)	80	70	75	170	140	120	160	210	250	190

[0072] Das „ausgerichtete Metall“ in den Tabellen 1 und 2 bedeutet, dass in den Basismaterialien 11a und 21a ein Plattierungsmaterial verwendet wird, das durch Plattierung eines Edelstahlbandes mit einer Kupferschicht und einer Nickelschicht gebildet wird. Ferner bedeutet „IBAD“ in den Tabellen 1 und 2, dass die Zwischenschichten 11b und 21b durch IBAD gebildet werden.

[0073] Eine Bedingung A wird unter der Voraussetzung definiert, dass die arithmetische Mittenrauheit auf jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b 20 nm oder mehr beträgt. Eine Bedingung B wird unter der Voraussetzung definiert, dass die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils 0,25 μm oder mehr beträgt. In den Proben 1 bis 16 und 19 waren beide Bedingungen A und B erfüllt. Bei den Proben 17 und 18 war mindestens eine der Bedingungen A und B nicht erfüllt.

[0074] Im ersten Test wurde der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 in jeder der Proben 1 bis 19 gemessen. In den Proben 1 bis 16 und 19 betrug der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 200 $\text{n}\Omega\cdot\text{cm}^2$ oder weniger. Bei den Proben 17 und 18 lag der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 über 200 $\text{n}\Omega\cdot\text{cm}^2$. Der zuvor erwähnte Vergleich hat empirisch gezeigt, dass der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 gesenkt wird, wenn beide Bedingungen A und B erfüllt sind.

(Zweiter Test)

[0075] Im zweiten Test wurden die Proben 20 bis 29 jeweils als eine Probe der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur hergestellt. In den Proben 20 bis 29 wurden die Typen des ersten Substrats 11 und des zweiten Substrats 21, das Filmbildungsverfahren für die erste supraleitende Schicht 12 und die zweite supraleitende Schicht 22, die Dicken T1 und T3, die Dicken T2 und T4, die arithmetische Mittenrauheit auf jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b, die maximale Höhe jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b und die Verbindungslänge geändert. Die Einzelheiten der Proben 20 bis 29 sind in Tabelle 3 aufgeführt. Obwohl in Tabelle 3 nicht aufgeführt, wurde die Probe 30 als Vergleichsbeispiel hergestellt. Im Vergleichsbeispiel betrug jede der Dicken T2 und T4 0,5 μm . In den Proben 20 bis 29 betrug die Breite der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22 jeweils 4 mm, und der Wert, der sich aus der Multiplikation dieser Breite mit jeder der in Tabelle 3 angegebenen Verbindungslängen ergibt, wurde als Verbindungsfläche definiert, die zur Berechnung des Verbindungswiderstands verwendet wird.

[0076] In den Proben 20 bis 30 hat der erste supraleitende Draht 10 keine erste Stabilisierungsschicht 14, und der zweite supraleitende Draht 20 hat keine zweite Stabilisierungsschicht 24. In den Proben 20 bis 30 wurden die erste Schutzschicht 13 und die zweite Schutzschicht 23 jeweils aus Silber hergestellt. Mit anderen Worten, die Proben 20 bis 30 haben jeweils die in **Fig. 2** gezeigte Struktur.

[Tabelle 3]

Probe	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Typen des ersten Substrats 11 und zweiten Substrats 12	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	Ausgerichtetes Metall	IBAD	IBAD
Filmbildungsverfahren für erste supraleitende Schicht 12 und zweite supraleitende Schicht 22	PLD	PLD	PLD	PLD	PLD	MOD	MOD	MOD	MOD	MOD
Dicke T1 und Dicke T3 (µm)	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2
Dicke T2 und Dicke T4 (µm)	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Ra der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	160	160	160	160	160	80	50	40	30	10
Rz der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	3,0	7,1	3,2	8,9	3,9	1,2	1,2	0,90	1,1	1,1
Verbindungsgröße (cm)	1	10	1	5	10	1	5	10	1	10
Verbindungsgegenstand (nΩ·cm²)	38	46	80	70	70	130	160	180	200	350

[0077] In den Proben 20 bis 28 waren beide Bedingungen A und B erfüllt, und zusätzlich betrugen die Dicken T2 und T4 jeweils 1,0 µm oder mehr. Ferner betrug in den Proben 20 bis 28 der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 200 nΩ·cm² oder weniger.

[0078] In Probe 29 war eine der Bedingungen A und B nicht erfüllt. In Probe 29 wurde die Verbindung zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 erreicht, aber der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 überstieg 200 nΩ·cm². In der Probe 30 wurde die Verbindung zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 nicht erreicht.

[0079] Der zuvor erwähnte Vergleich hat empirisch gezeigt, dass selbst dann, wenn Silber im Bestandteilmaterial der ersten Schutzschicht 13 als äußerste Schicht des ersten supraleitenden Drahtes 10 und im Bestandteilmaterial der zweiten Schutzschicht 23 als äußerste Schicht des zweiten supraleitenden Drahtes 20 enthalten ist, Dicken T2 und T4 von 1,0 µm oder mehr es ermöglichen, das Auftreten eines Verbindungsversagens infolge der Auflösung der ersten Schutzschicht 13 und der zweiten Schutzschicht 23 zu verhindern.

[0080] Die Proben 1, 2, 3, 4 und 5 sind die gleichen wie die Proben 22, 23, 24, 25 und 26 in Bezug auf die Typen des ersten Substrats 11 und des zweiten Substrats 21, das Filmbildungsverfahren für die erste supraleitende Schicht 12 und die zweite supraleitende Schicht 22, die arithmetische Mittenrauheit auf jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b und die maximale Höhe jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b.

[0081] Die Proben 1, 2, 3, 4 und 5 unterscheiden sich von den Proben 22, 23, 24, 25 und 26 dadurch, dass die äußerste Schicht des ersten supraleitenden Drahts 10 die erste Stabilisierungsschicht 14 und die äußerste Schicht des zweiten supraleitenden Drahts 20 die zweite Stabilisierungsschicht 24 ist, d.h., Kupfer ist im Bestandteilmaterial der äußersten Schicht des ersten supraleitenden Drahts 10 und des zweiten supraleitenden Drahts 20 enthalten.

[0082] Die Proben 1, 2, 3, 4 und 5 weisen einen geringeren Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 auf als die Proben 22, 23, 24, 25 bzw. 26.

[0083] Der zuvor erwähnte Vergleich hat empirisch gezeigt, dass, wenn Kupfer im Bestandteilmaterial der äußersten Schicht des ersten supraleitenden Drahts 10 und des zweiten supraleitenden Drahts 20 enthalten ist, die Konnektivität zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 verbessert wird und somit der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 gesenkt wird.

(Dritter Test)

[0084] Im Folgenden wird ein dritter Test beschrieben.

[0085] Im dritten Test wurden die Proben 31 und 32 jeweils als eine Probe der supraleitenden Drahtverbindungsstruktur hergestellt. In den Proben 31 und 32 wurden die arithmetische Mittenrauheit auf jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b, die maximale Höhe jeder der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b und die Verbindungslänge geändert. In den Proben 31 und 32 waren die Dicken T1 und T2 jeweils 3 µm, die Zwischenschichten 11b und 21b wurden durch IBAF gebildet, und die erste supraleitende Schicht 12 und die zweite supraleitende Schicht 22 wurden durch MOD gebildet.

[0086] Die Einzelheiten der Proben 31 und 32 sind in Tabelle 4 dargestellt. In den Proben 31 und 32 war das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Schutzschicht 13 und die zweite Schutzschicht 23 gebildet sind, Silber, und das Bestandteilmaterial, aus dem die erste Stabilisierungsschicht 14 und die zweite Stabilisierungsschicht 24 gebildet sind, Kupfer. In den Proben 31 und 32 betrug die Breite der ersten supraleitenden Schicht 12 und der zweiten supraleitenden Schicht 22 jeweils 4 mm, und der Wert, der sich aus der Multiplikation dieser Breite mit jeder der in Tabelle 4 angegebenen Verbindungslängen ergibt, wurde als Verbindungsfläche definiert, die zur Berechnung des Verbindungswiderstandes verwendet wird.

[Tabelle 4]

Probe	31	32
Typen des ersten Substrats 11 und zweiten Substrats 12	IBAD	IBAD
Filmbildungsverfahren für erste supraleitende Schicht 12 und zweite supraleitende Schicht 22	MOD	MOD
Dicke T1 und Dicke T3 (μm)	3	3
Ra der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	80	60
Rz der zweiten Fläche 12b und vierten Fläche 22b (nm)	0,24	0,23
Verbindungslänge (cm)	1	10
Verbindungswiderstand ($\text{n}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	90	100

[0087] Bei den Proben 31 und 32 betrug die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils 60 nm oder mehr, während die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils weniger als 0,25 μm betrug. Der Verbindungswiderstand jeder der Proben 31 und 32 betrug 200 $\text{n}\Omega\cdot\text{cm}^2$ oder weniger. Der oben erwähnte Vergleich ergab empirisch, dass in dem Fall, in dem die arithmetische Mittenrauheit auf der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils 60 nm oder mehr beträgt, der Verbindungswiderstand zwischen dem ersten supraleitenden Draht 10 und dem zweiten supraleitenden Draht 20 verringert ist, selbst wenn die maximale Höhe der zweiten Fläche 12b und der vierten Fläche 22b jeweils weniger als 0,25 μm beträgt.

[0088] Die zuvor beschriebenen Ausführungsformen umfassen die folgenden Aspekte.

[Ergänzende Anmerkung 1]

[0089] Ein supraleitender Draht umfasst ein Substrat und eine supraleitende Schicht, die auf dem Substrat angeordnet ist. Die supraleitende Schicht umfasst eine erste Fläche, die dem Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt. Die zweite Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 60 nm oder mehr.

[Ergänzende Anmerkung 2]

[0090] Eine supraleitende Drahtverbindungsstruktur umfasst einen ersten supraleitenden Draht, einen zweiten supraleitenden Draht und eine Verbindungsschicht. Der erste supraleitende Draht umfasst ein erstes Substrat, eine erste supraleitende Schicht, die auf dem ersten Substrat angeordnet ist, und eine erste Schutzschicht, die auf der ersten supraleitenden Schicht angeordnet ist. Der zweite supraleitende Draht umfasst ein zweites Substrat, eine zweite supraleitende Schicht, die auf dem zweiten Substrat angeordnet ist, und eine zweite Schutzschicht, die auf der zweiten supraleitenden Schicht angeordnet ist. Die erste supraleitende Schicht umfasst eine erste Fläche, die dem ersten Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt. Die zweite supraleitende Schicht umfasst eine dritte Fläche, die dem zweiten Substrat zugewandt ist, und eine vierte Fläche, die der dritten Fläche gegenüberliegt. Die erste Schutzschicht ist mit der zweiten Schutzschicht durch eine Verbindungsschicht verbunden. Die zweite Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 μm oder mehr. Die vierte Fläche umfasst einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 μm oder mehr.

[Ergänzende Anmerkung 3]

[0091] Gemäß der in der ergänzenden Anmerkung 2 beschriebenen supraleitenden Drahtverbindungsstruktur enthält das Bestandteilmaterial sowohl der ersten Schutzschicht als auch der zweiten Schutzschicht Silber.

[Ergänzende Anmerkung 4]

[0092] Gemäß der in der ergänzenden Anmerkung 3 beschriebenen supraleitenden Drahtverbindungsstruktur haben die erste Schutzschicht und die zweite Schutzschicht jeweils eine Dicke von 1,0 µm oder mehr.

[0093] Es sollte verstanden werden, dass die hier offenbarten Ausführungsformen der Veranschaulichung dienen und in keinerlei Hinsicht einschränkend sind. Der Umfang der vorliegenden Erfindung wird durch den Umfang der Ansprüche und nicht durch die zuvor beschriebenen Ausführungsformen definiert und soll alle Modifikationen innerhalb der Bedeutung und des Umfangs umfassen, die dem Umfang der Ansprüche entsprechen.

Bezugszeichenliste

[0094] 10 erster supraleitender Draht, 11 erstes Substrat, 11a Basismaterial, 11b Zwischenschicht, 12 erste supraleitende Schicht, 12a erste Fläche, 12b zweite Fläche, 13 erste Schutzschicht, 14 erste Stabilisierungsschicht, 20 zweiter supraleitender Draht, 21 zweites Substrat, 21a Basismaterial, 21b Zwischenschicht, 22 zweite supraleitende Schicht, 22a dritte Fläche, 22b vierte Fläche, 23 zweite Schutzschicht, 24 zweite Stabilisierungsschicht, 30 Verbindungsschicht, 100 supraleitender Draht Verbindungsstruktur, T1, T2, T3, T4 Dicke.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- JP 2021156923 [0001]
- JP 2014120383 [0002, 0004]

Patentansprüche

1. Supraleitender Draht, umfassend:
ein Substrat; und
eine supraleitende Schicht, die auf dem Substrat angeordnet ist, wobei
die supraleitende Schicht eine erste, dem Substrat zugewandte Fläche und eine zweite, der ersten Fläche gegenüberliegende Fläche aufweist, und
die zweite Fläche einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 μm oder mehr aufweist.
2. Supraleitender Draht gemäß Anspruch 1, wobei der Abschnitt eine arithmetische Mittenrauheit von 60 nm oder mehr und eine maximale Höhe von 0,25 μm oder mehr aufweist.
3. Supraleitender Draht gemäß Anspruch 1 oder 2, ferner umfassend: eine Schutzschicht, die auf der supraleitenden Schicht angeordnet ist, wobei ein Bestandteilmaterial der Schutzschicht Kupfer enthält.
4. Supraleitender Draht gemäß Anspruch 1 oder 2, ferner umfassend: eine Schutzschicht, die auf der supraleitenden Schicht angeordnet ist, wobei ein Bestandteilmaterial der Schutzschicht Silber enthält.
5. Supraleitender Draht gemäß Anspruch 4, wobei
die Schutzschicht eine äußerste Schicht des supraleitenden Drahtes bildet, und
die Schutzschicht eine Dicke von 1,0 μm oder mehr aufweist.
6. Supraleitender Draht gemäß Anspruch 3 oder 4, ferner umfassend: eine Stabilisierungsschicht, die auf der Schutzschicht angeordnet ist, wobei ein Bestandteilmaterial der Stabilisierungsschicht Kupfer oder eine Kupferlegierung ist.
7. Supraleitender Draht gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die supraleitende Schicht eine Dicke von 4,5 μm oder weniger aufweist.
8. Supraleitende Drahtverbindungsstruktur, umfassend:
einen ersten supraleitenden Draht;
einen zweiten supraleitenden Draht; und
eine Verbindungsschicht, wobei
der erste supraleitende Draht ein erstes Substrat, eine auf dem ersten Substrat angeordnete erste supraleitende Schicht, eine auf der ersten supraleitenden Schicht angeordnete erste Schutzschicht und eine auf der ersten Schutzschicht angeordnete erste Stabilisierungsschicht aufweist,
der zweite supraleitende Draht ein zweites Substrat, eine auf dem zweiten Substrat angeordnete zweite supraleitende Schicht, eine auf der zweiten supraleitenden Schicht angeordnete zweite Schutzschicht und eine auf der zweiten Schutzschicht angeordnete zweite Stabilisierungsschicht aufweist,
die erste supraleitende Schicht eine erste Fläche, die dem ersten Substrat zugewandt ist, und eine zweite Fläche, die der ersten Fläche gegenüberliegt, aufweist,
die zweite supraleitende Schicht eine dritte Fläche, die dem zweiten Substrat zugewandt ist, und eine vierte Fläche, die der dritten Fläche gegenüberliegt, aufweist,
die erste Stabilisierungsschicht mit der zweiten Stabilisierungsschicht durch die Verbindungsschicht verbunden ist,
die zweite Fläche einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 μm oder mehr aufweist, und
die vierte Fläche einen Abschnitt mit einer arithmetischen Mittenrauheit von 20 nm oder mehr und einer maximalen Höhe von 0,25 μm oder mehr aufweist.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

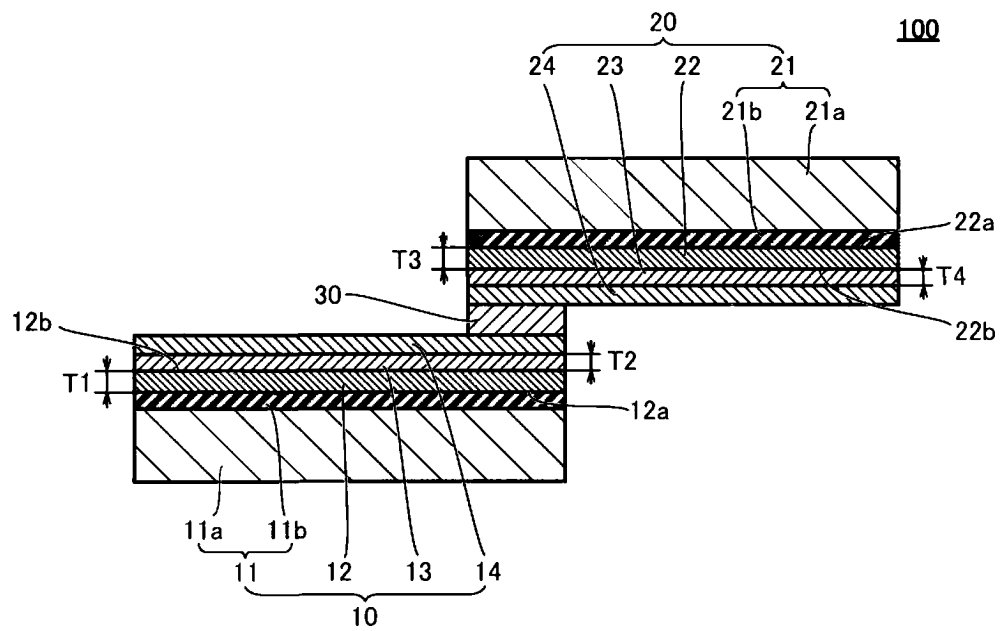


FIG. 2

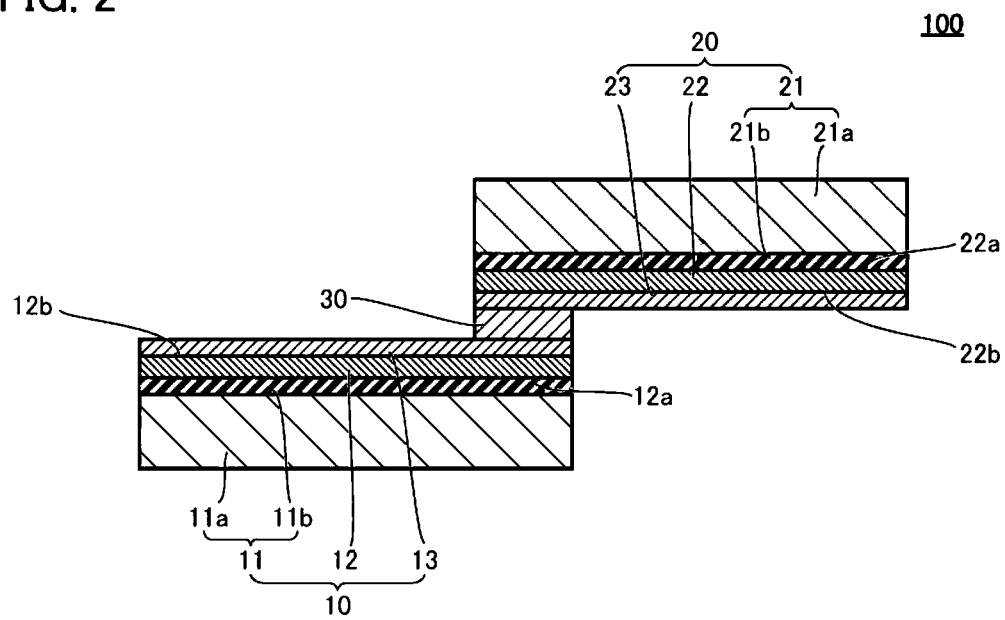


FIG. 3

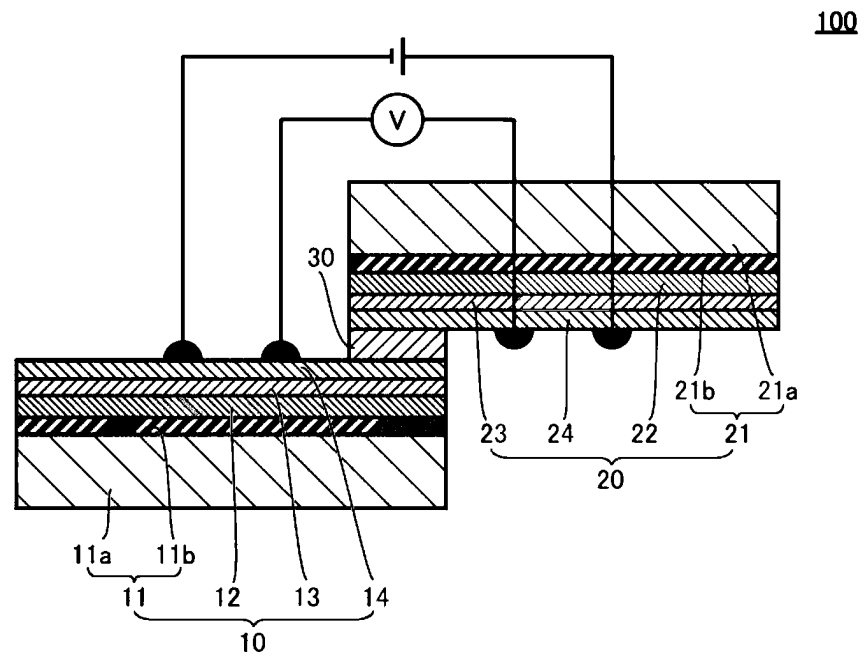


FIG. 4

