

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6667543号
(P6667543)

(45) 発行日 令和2年3月18日(2020.3.18)

(24) 登録日 令和2年2月27日(2020.2.27)

(51) Int.Cl.		F I			
HO 1 B	12/06	(2006.01)	HO 1 B	12/06	Z A A
HO 1 F	6/06	(2006.01)	HO 1 F	6/06	5 0 0
HO 1 R	4/68	(2006.01)	HO 1 R	4/68	

請求項の数 8 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2017-543503 (P2017-543503)	(73) 特許権者	000005290
(86) (22) 出願日	平成28年9月28日 (2016.9.28)		古河電気工業株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2016/078664		東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
(87) 国際公開番号	W02017/057483	(74) 代理人	100114890
(87) 国際公開日	平成29年4月6日 (2017.4.6)		弁理士 アインゼル・フェリックス＝ライ ンハルト
審査請求日	令和1年5月20日 (2019.5.20)	(74) 代理人	100116403
(31) 優先権主張番号	特願2015-195751 (P2015-195751)		弁理士 前川 純一
(32) 優先日	平成27年10月1日 (2015.10.1)	(74) 代理人	100135633
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		弁理士 二宮 浩康
		(74) 代理人	100162880
			弁理士 上島 類
		(74) 代理人	100143959
			弁理士 住吉 秀一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超電導線材の接続構造

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板と超電導層とが積層形成されてなる複数の超電導線材同士を重ね合わせて接続する接続構造において、

少なくとも一つの超電導線材の超電導層の表面の一部に、非超電導体が前記表面から突出するように設けられていることを特徴とする超電導線材の接続構造。

【請求項 2】

前記非超電導体は、その一部が前記超電導層の表面に埋設されていることを特徴とする請求項 1 に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 3】

前記基板と前記超電導層の間に、中間層が設けられていることを特徴する、請求項 1 又は 2 に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 4】

前記非超電導体の突出する部分を含む前記超電導層の表面上に、他の超電導線材との接合部位を構成する接続用超電導層が形成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のうち何れか 1 項に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 5】

前記非超電導体は、Cu、Ba、Al、Y、Gd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Zr、Hfのうち少なくとも 1 種類の元素を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のうち何れか 1 項に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 6】

前記非超電導体は、 CuO_x を含むことを特徴とする請求項 1 乃至 5 のうち何れか 1 項に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 7】

前記複数の超電導線材が 2 つの超電導線材であり、

前記非超電導体は、少なくとも一方の超電導線材の超電導層の表面における接合部位となる重ね合わせ部に設けられていることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のうち何れか 1 項に記載の超電導線材の接続構造。

【請求項 8】

前記複数の超電導線材が 3 つの超電導線材であり、

前記超電導層の表面が同じ向きになる位置関係で端面同士を突き合わせた第 1 及び第 2 の超電導線材と、前記第 1 及び第 2 の超電導線材の前記超電導層の表面の双方に跨がって接続される位置関係で対向させて超電導層を配置した第 3 の超電導線材とを、互いに重ね合わせて接続する接続構造において、

前記非超電導体は、対向する少なくとも一方の超電導線材の超電導層の表面における接合部位となる重ね合わせ部に設けられていることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のうち何れか 1 項に記載の超電導線材の接続構造。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の超電導線材を接続する超電導線材の接続構造に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、液体窒素の温度で超電導性を有する高温超電導体を利用した高温超電導線材の開発が行われている。このような高温超電導線材を用いて超電導機器用の超電導ケーブルや超電導コイルなどを作製する場合、長尺の超電導線材が必要となる。長尺の超電導線材は、複数の超電導線材を順次接続することにより得られる。また、超電導線材を、例えば、磁気共鳴画像 (MRI) 装置や核磁気共鳴 (NMR) 装置に用いられるコイルに応用する場合には、永久電流モードで通電するので超電導線材の端を接続してループ状にする必要がある。

【0003】

超電導線材同士を接続する従来技術として、例えば特許文献 1 には、超電導薄膜の接合箇所、超電導薄膜を構成する金属を含む溶液の膜を形成し、形成された溶液の膜を加熱処理することにより、接合箇所に超電導接合を形成して高温超電導薄膜線材を接続する技術が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2013 - 235699 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、特許文献 1 に記載された従来技術では、超電導薄膜線材の超電導薄膜同士を接続する際に、超電導薄膜同士を貼り合わせた状態で、仮焼熱処理及び本焼熱処理を行うため、次の理由から超電導特性が低下する虞がある。まず、高温で焼成処理を行うため、超電導薄膜上に形成された膜に適切な量の酸素を供給することができず、膜が結晶化しない虞がある。

【0006】

また、焼成後に酸素導入処理を行うが、超電導薄膜上に形成された膜に酸素を供給することができず、超電導薄膜線材を接続した後の超電導特性を確保することができないとい

10

20

30

40

50

う問題を有している。

【0007】

本発明は前記した点に鑑みてなされたものであり、良好な超電導特性を実現して超電導線材同士を接続することが可能な超電導線材の接続構造を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る超電導線材の接続構造は、基板と超電導層とが積層形成されてなる複数の超電導線材同士を重ね合わせて接続する接続構造において、少なくとも一つの超電導線材の超電導層の表面の一部に、非超電導体が前記表面から突出するように設けられていることを特徴とする。

10

【0009】

本発明によれば、少なくとも一つの超電導線材の超電導層の表面の一部に、非超電導体が設けられていることにより、超電導線材同士の接合部位に隙間が形成される。このようにして形成される隙間から超電導線材同士の接合部位に酸素が十分に供給されることで、当該接合部位の超電導層が結晶化し、電気的な特性を劣化させることなく超電導線材同士を接続することが可能となる。

【0010】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記非超電導体の一部が前記超電導層の表面に埋設されていることを特徴とする。

【0011】

20

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記基板と前記超電導層の間に、中間層が設けられていることを特徴とする。

【0012】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記非超電導体の突出する部分を含む前記超電導層の表面上に、他の超電導線材との接合部位を構成する接続用超電導層が形成されていることを特徴とする。

【0013】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、非超電導体が、Cu、Ba、Al、Y、Gd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Zr、Hfのうち少なくとも1種類の元素を含むことを特徴とする。

30

【0014】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記非超電導体は、CuO_xを含むことを特徴とする。

【0015】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記複数の超電導線材が2つの超電導線材であり、前記非超電導体は、少なくとも一方の超電導線材の超電導層の表面における接合部位となる重ね合わせ部に設けられていることを特徴とする。

【0016】

また、本発明に係る超電導線材の接続構造は、好ましくは、前記複数の超電導線材が3つの超電導線材であり、前記超電導層の表面が同じ向きになる位置関係で端面同士を突き合わせた第1及び第2の超電導線材と、前記第1及び第2の超電導線材の前記超電導層の表面の双方に跨がって接続される位置関係で対向させて超電導層を配置した第3の超電導線材とを、互いに重ね合わせて接続する接続構造において、前記非超電導体は、対向する少なくとも一方の超電導線材の超電導層の表面における接合部位となる重ね合わせ部に設けられていることを特徴とする。

40

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、良好な超電導特性を実現して超電導線材同士を接続することが可能な超電導線材の接続構造を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

50

【0018】

【図1】図1は、超電導線材の積層構造を示す断面図である。

【図2】図2は、超電導線材同士を接続する接続工程について説明するための断面図である。

【図3】図3(A)は、本発明に係る接続構造を説明するための断面図であり、図3(B)は、比較例に係る接続構造を説明するための断面図である。

【図4】図4は、変形例に係る非超電導体について説明するための断面図である。

【図5】図5は、本実施形態に係る他の適用例について説明するための断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0019】

本発明を実施するための形態（以下、本実施形態という。）について具体例を示して説明する。本実施形態は、複数の超電導線材を接続する超電導線材の接続構造に関するものである。まず、超電導線材の接続構造に関する具体的な説明に先立ち、超電導線材の具体例として高温超電導線材の構成について、図1の断面図を用いて説明する。

【0020】

（1．高温超電導線材）

図1(A)に示すように、高温超電導線材100は、本発明に係る超電導線材の一態様であって、基板101と、中間層102と、超電導層103と、保護層104と、から構成されている。

【0021】

基板101は、テープ状に形成されている。この基板101としては、例えば、低磁性の無配向金属基板や無配向セラミックス基板が用いられる。金属基板の材料には、例えば、強度および耐熱性に優れた、Co、Cu、Ni、Ti、Mo、Nb、Ta、W、Mn、Fe、Ag、Crなどの金属またはこれらの合金が用いられる。特に好ましいのは、耐食性および耐熱性の点で優れているステンレス鋼、ハステロイ（登録商標）に代表されるニッケル系合金である。また、セラミックス基板の材料には、例えば、MgO、SrTiO₃またはイットリウム安定化ジルコニアなどが用いられる。

【0022】

中間層102は、超電導層103の下地となる任意の層であり、超電導層103において高い2軸配向性を実現するために基板101上に形成される層である。この中間層102には、熱膨張率や格子定数などの物理的な特性値が基板101と超電導層103を構成する超電導体との中間的な値を示すもの、例えば、MgO、CeO₂が用いられる。また、中間層102は、単層構造であってもよく、多層構造であってもよい。なお、基板101が金属基板である場合、中間層102はセラミック薄膜であってもよい。

【0023】

超電導層103は、中間層102の表面に形成され、超電導体を主体として、Cu、Ba、Y、Gd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Zr、Hfのうち少なくとも1種類の元素から構成される。具体的に、超電導体としては、REBa₂Cu₃O_{7-x}（xは0から6の整数）で表されるRE系超電導体が用いられる。RE系超電導体中のREは、Y、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、YbやLuなどの単一の希土類元素または複数の希土類元素である。

【0024】

また、後述するように良好な超電導特性を実現して超電導線材100、100同士を接続するため、図1(B)に示すように、超電導層103の表面103aには、例えばCu_xOなどの非超電導体105が設けられている。

【0025】

具体的には、図1(B)に示すように、化学気相蒸着（CVD）法により超電導層103を多層構造になるよう形成する際に、最下層から第6層までの低層領域1031では1層あたりの膜厚を200nmよりも薄くし、最上位層1032（第7層）の膜厚を200nm以上に厚くすれば、超電導層103の超電導特性に影響を及ぼさず、非超電導体10

10

20

30

40

50

5 (例えば、酸化銅)を超電導層103の表面103aに析出させることができる。より具体的には、非超電導体105の一部分が超電導層103の内部に埋設した状態で、残りの部分が超電導層103の表面103aから突出するように形成することができる。また、超電導層103の表面103aにおける非超電導体105の面積密度は、超電導層103の表面103aを電子顕微鏡などで観察することにより確認ないし測定することができる。

【0026】

上記の通り、CVD法による超電導層103の積層工程において、1層あたりの膜厚を200nm以上に厚くすることで、非超電導体105である酸化銅(Cu_xO)粒を生成させやすくすることができる。なお、非超電導体105は、上述した酸化銅(Cu_xO)に限らず、Cu、Ba、Al、Y、Gd、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Zr、Hfのうち少なくとも1種類の元素から構成されてもよい。

10

【0027】

また、非超電導体105は、CVD法以外に、MOD法、ゾルゲル法などの他の方法でも超電導層103の表面103aから突出するように設けることができる。

【0028】

保護層104は、超電導層103の表面を覆う任意の層である。保護層104には、例えば、Agなどが用いられる。

【0029】

(2. 超電導線材の接続構造)

20

次に、上述した積層構造を有する超電導線材100を2つ準備し、準備した超電導線材100、100を接続する接続工程について、図2を参照して説明する。便宜上、一方の超電導線材100を超電導線材100Aと呼び、他方の超電導線材100を超電導線材100Bと呼ぶ。

【0030】

まず、図2(A)に示すように、超電導線材100Aと超電導線材100Bそれぞれについて、保護層104のうち、接続に必要な領域だけエッチングすることにより、超電導層103を露出させる。

【0031】

次に、有機金属分解(MOD)法により接続用超電導層200を形成させる。具体的に、まず、Y、Ba、Cuなどの有機金属錯体を含む原料溶液20を準備する。準備した原料溶液20を、露出させた超電導層103の表面に塗布する。ここで、原料溶液20は、露出させた超電導層103の全面にわたって塗布されるが、塗布量は特に限定されず、適宜設定することができる。なお、本実施形態においては、MOD法により原料溶液20を塗布する方法を示したが、これに限定されるものではない。

30

【0032】

続いて、図2(B)に示すように、超電導線材100Aと超電導線材100Bそれぞれについて、仮焼成することで、超電導層103の表面に塗布された原料溶液20から有機溶剤を蒸発させる。ここで、仮焼成は、例えば、400~600で加熱処理することにより行われるものである。この仮焼成により、原料溶液20に含まれる有機金属錯体の分解が行われる。このような仮焼成を行うことにより、非超電導体105の突出している部分を含む超電導層103の表面全体に、接続用超電導層200が形成される。

40

【0033】

続いて、図2(C)に示すように、超電導線材100A、100Bの超電導層103上にそれぞれ形成された接続用超電導層200を、互いに重ね合わせ、所定の圧力で押し付ける。その後、押し付けた状態のまま、低酸素濃度雰囲気中、例えば、酸素濃度50~1000ppmのAr雰囲気中に置き、750~850程度の温度で本焼成処理を行う。この本焼成処理により、接続用超電導層200が結晶化することで、接続用超電導層200同士が互いに接合する。さらに、酸素アニール処理として、酸素濃度が50%以上のAr雰囲気下で降温することで、本焼成処理された接続用超電導層200中に酸素を導入

50

させる。この酸素導入により、接続用超電導層 200 が超電導特性を示す構造になる。

【0034】

このような酸素を導入する工程において、超電導線材 100A、100B の接続部位を拡大視した構造を図 3(A) に示す。図 3(A) から明らかなように、超電導線材 100A、100B それぞれにおいて超電導層 103 の表面 103a に、非超電導体 105 が設けられているため、接続用超電導層 200 の表面が凹凸になる。このようにして表面が凹凸な接続用超電導層 200 同士が対向するように超電導線材 100A、100B を重ね合わせることで、図 3(A) に示すように、超電導線材 100A、100B の接合部位、すなわち接続用超電導層 200、200 の間に、隙間 300 が形成される。このような隙間 300 が形成されることで、酸素導入時において、接続用超電導層 200、200 に酸素

10

【0035】

上記のとおり、非超電導体 105 は、超電導層 103 の表面 103a から突出している。非超電導体 105 における突出部は、平均径が $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ であり、平均高さが $0.01 \sim 5 \mu\text{m}$ であることが好ましい。平均径は、SEM で観察し、最長径を測定した後、その平均値を算出することにより得られる。また、平均高さは、突出部を厚さ方向に切断し、断面を SEM で観察することにより測定することができる。平均径及び平均高さが大きすぎると、非超電導体の周囲に形成される空隙が多くなり、接続強度が低下する傾向にある。一方、平均径及び平均高さが小さすぎると、形成される空隙が小さいため酸素を

20

【0036】

上記のような本実施形態に対して、図 3(B) に、比較例に係る超電導線材 400A、400B の接続部位を拡大視した構造を示す。比較例に係る超電導線材 400A、400B は、それぞれ超電導層 403 の表面に設けられている非超電導体 405 を研磨して、超電導層 403 の表面を平坦にしたものである。このように超電導層 403 の表面が平坦であると、接続用超電導層 500、500 の表面も平坦となり、図 3(A) に示したような隙間 300 がほとんど形成されない。この結果、接続用超電導層 500、500 が結晶化せず、良好な超電導特性を実現することができない。

【0037】

上記の比較例と本実施形態との比較結果から明らかなように、本実施形態に係る超電導線材 100A、100B の接続構造によれば、超電導線材 100A、100B にそれぞれに形成される接続用超電導層 200、200 が確実に結晶化することにより、電気的な特性を劣化させることなく超電導線材 100A、100B 同士を接続することが可能となる。

30

【0038】

また、接続用超電導層 200 の膜厚は、MOD 法により成膜する場合には 10 nm 乃至 $5 \mu\text{m}$ が好ましい。これは、薄すぎると接続用超電導層 200、200 同士の接続面積が減少してしまう一方、厚すぎると隙間 300 が形成できず結晶化が困難となるからである。

40

【0039】

また、本実施形態に係る超電導線材 100A、100B の接続構造によれば、空隙 301 が形成されることにより、確実に結晶化するまで十分に酸素を接続用超電導層 200 に供給できる点で好ましい。

【0040】

また、本実施形態では、非超電導体 105 が、超電導層 103 の表面 103a から突出し、かつ超電導層 103 の表面 103a に埋設されているため、接続強度を高くすることができる。特に、上述した空隙 301 の存在により接続強度の低下を招くが、非超電導体 105 が超電導層 103 の表面 103a に埋設されていることで強固な接続構造を実現できる点で好ましい。

50

【 0 0 4 1 】

(3 . 変形例)

なお、本実施形態に係る非超電導体 1 0 5 は、超電導層 1 0 3 の表面 1 0 3 a から突出し、かつ超電導層 1 0 3 の表面 1 0 3 a に埋設されている場合に限定されない。例えば、図 4 に、変形例に係る非超電導体 1 0 5 B を示す。つまり、図 4 (A) に示すように、表面が平坦になるよう成長させた超電導層 1 0 3 B の表面に、アルミナなどの微粒子を非超電導体 1 0 5 B として設けてもよい。続いて、図 4 (B) に示すように、非超電導体 1 0 5 B が設けられている超電導層 1 0 3 B に、原料溶液を塗布ないし仮焼成することで、表面が凹凸な接続用超電導層 2 0 0 B を形成することができる。特に、図 4 に示す変形例によれば、超電導層 1 0 3 の成膜の条件を何ら変更することなく、微粒子の密度を調整する
10

【 0 0 4 2 】

(4 . 他の適用例)

また、本実施形態では、上述した図 2 及び図 3 に示すように、2 つの超電導線材 1 0 0 A、1 0 0 B を、超電導層 1 0 3 同士が対向するように重ね合わせて接続する接続構造において、非超電導層 1 0 5 が、超電導層表面における重ね合わせ部に設けられている場合を示したが、種々の接続構造においても、良好な超電導特性を実現して超電導線材同士を
20

【 0 0 4 3 】

例えば、他の適用例として、図 5 に示すように、超電導層の表面が同じ向きになる位置関係で端面同士を突き合わせた第 1 及び第 2 の超電導線材 1 0 0 C、1 0 0 D と、第 1 及び第 2 の超電導線材 1 0 0 C、1 0 0 D の超電導層の表面の双方を跨がって接続される位置関係で対向させて配置した第 3 の超電導線材 1 0 0 E とを、互いに重ね合わせて接続する接続構造が挙げられる。第 1 乃至第 3 の超電導線材 1 0 0 C、1 0 0 D、1 0 0 E のそれぞれにおいて、超電導層 1 0 3 の表面に非超電導体 1 0 5 を設けることにより、良好な超電導特性を実現して第 1 乃至第 3 の超電導線材 1 0 0 C、1 0 0 D、1 0 0 E の三者間
30

【 0 0 4 4 】

なお、上記図 5 に示す適用例以外にも、例えば、一の超電導線材の終端領域を 2 つの領域に分け、それぞれの領域において異なる 2 つの超電導線材を突き合わせることで、略 Y 字分岐となる接続構造を実現することも可能である。

【 0 0 4 5 】

(5 . その他)

本実施形態では、接続対象となる全ての超電導線材の超電導層の表面に、非超電導体を設けているが、本発明はこのような形態に限定されない。例えば、対向する 2 つの超電導層のうち一方の超電導層にのみ非超電導体を設けてもよい。一方の超電導線材の接続用超電導層の表面が凹凸になれば、接続用超電導層間に隙間が形成され、接続用超電導層を確実に結晶化することができる。また、図 2 (C) に示すように、超電導層の一部同士を接続する場合には、非超電導体は超電導層表面全体に設けられている必要はなく、少なくとも超電導層表面の重ね合わせ部に設けられていればよい。
40

【 符号の説明 】

【 0 0 4 6 】

1 0 0、1 0 0 A、1 0 0 B、1 0 0 C、1 0 0 D、1 0 0 E 超電導線材

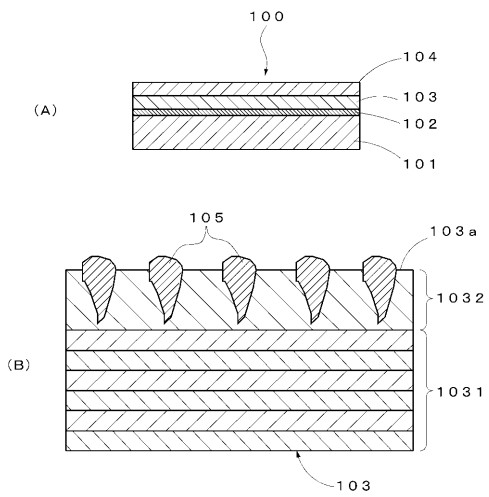
1 0 1 基板

1 0 2 中間層

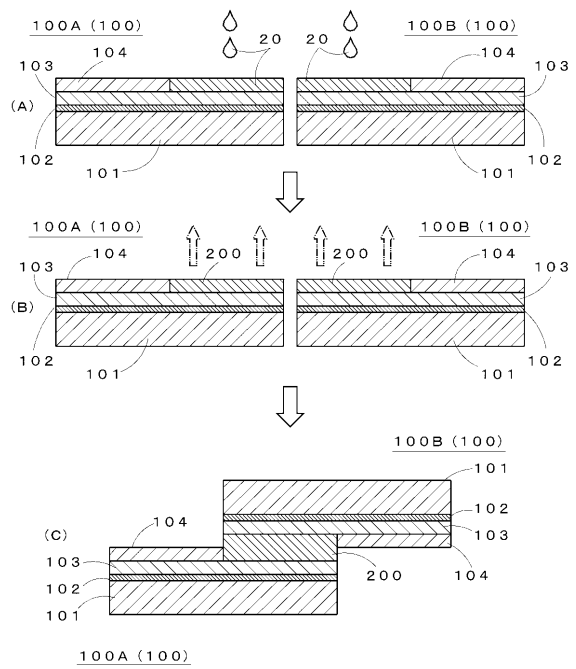
1 0 3 超電導層
50

- 1 0 3 a 表面
- 1 0 4 保護層
- 1 0 5 非超電導体
- 3 0 0 隙間
- 3 0 1 空隙

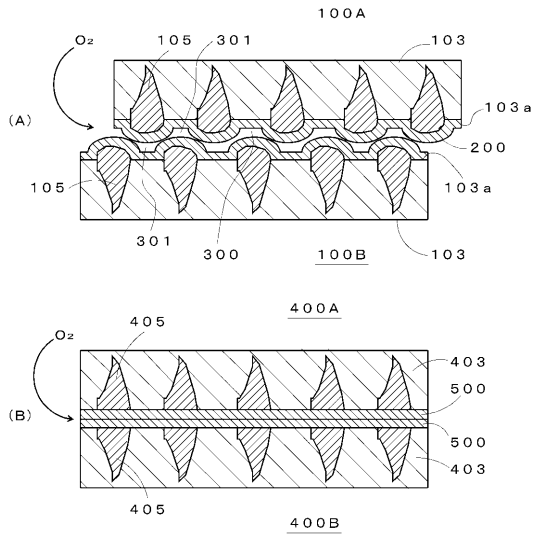
【 図 1 】



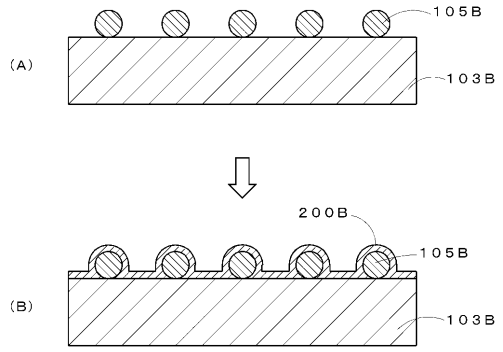
【 図 2 】



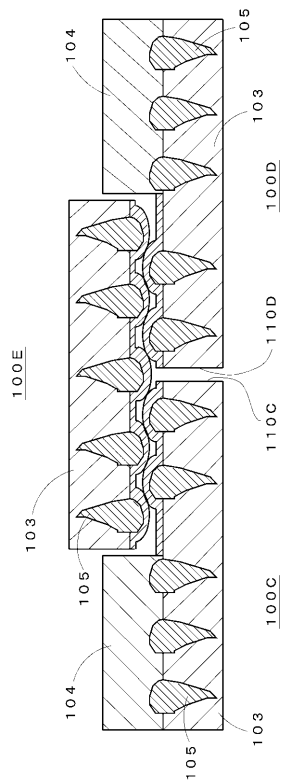
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

- (72)発明者 中井 昭暢
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 古河電気工業株式会社内
- (72)発明者 天野 俊昭
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 古河電気工業株式会社内
- (72)発明者 坂本 久樹
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 古河電気工業株式会社内

審査官 和田 財太

- (56)参考文献 特開平06-045046(JP,A)
特開2012-230869(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
- | | |
|------|-------|
| H01B | 12/06 |
| H01F | 6/06 |
| H01R | 4/68 |