

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014 年 12 月 4 日(04.12.2014)



(10) 国際公開番号

WO 2014/192806 A1

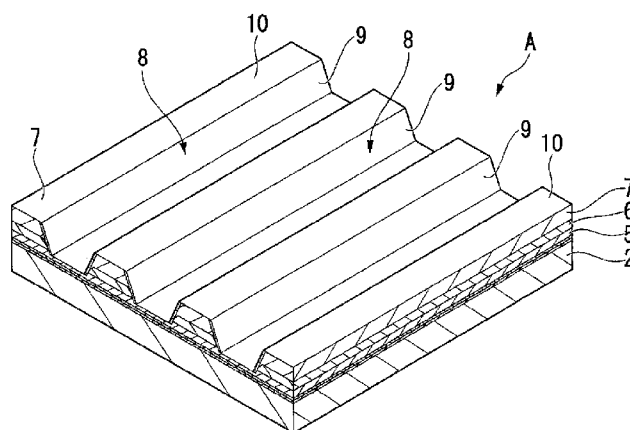
- (51) 国際特許分類:
H01B 12/06 (2006.01) H01B 13/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/064121
- (22) 国際出願日: 2014 年 5 月 28 日(28.05.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2013-112183 2013 年 5 月 28 日(28.05.2013) JP
- (71) 出願人: 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター (INTERNATIONAL SUPERCONDUCTIVITY TECHNOLOGY CENTER) [JP/JP]; 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 Kanagawa (JP). 株式会社フジクラ (FUJIKURA LTD.) [JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場 1 丁目 5 番 1 号 Tokyo (JP). 昭和電線ケーブルシステム株式会社 (SWCC SHOWA CABLE SYSTEMS CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1050001 東京都港区虎ノ門 1 丁目 1 番 18 号 Tokyo (JP). 古河電気工業株式会社 (FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号 Tokyo (JP).

- (72) 発明者: 町 敬人 (MACHI Takato); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP). 吉田 朋 (YOSHIDA Tomo); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP). 中村 達徳 (NAKAMURA Tatsunori); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP). 片山 功多 (KATAYAMA Kota); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP). 中尾 公一 (NAKAO Koichi); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP). 田辺 圭一 (TANABE Keiichi); 〒2130012 神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目 2 番 1 号 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 志賀 正武, 外 (SHIGA Masatake et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目 9 番 2 号 Tokyo (JP).

[続葉有]

(54) Title: OXIDE SUPERCONDUCTOR AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称: 酸化物超電導体およびその製造方法



(57) Abstract: An oxide superconductor is provided with: a metal substrate; an insulating intermediate layer provided on the substrate; an oxide superconductive layer provided on the intermediate layer; a metal stabilizing layer provided on the oxide superconductive layer; and a plurality of thinning grooves formed using laser irradiation so as to divide the metal stabilization layer and the oxide superconductive layer along the longitudinal direction of the substrate, reaching from the metal stabilization layer through the oxide superconductive layer to the interior of the intermediate layer, while not reaching the substrate. The metal stabilization layer and the oxide superconductive layer are divided by the plurality of thinning grooves so as to form a plurality of filament conductors, and the width of the groove openings of the thinning grooves, in each of the plurality of thinning grooves, being equal to or greater than the width of the groove bottoms of the thinning grooves.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2014/192806 A1



(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

酸化物超電導導体が、金属製の基材と、前記基材上に設けられた絶縁性の中間層と、前記中間層上に設けられた酸化物超電導層と、前記酸化物超電導層上に設けられた金属安定化層と、前記基材の長手方向に沿って前記金属安定化層と前記酸化物超電導層とを分断し、前記金属安定化層から前記酸化物超電導層を介して前記中間層の内部に達し、前記基材に到達しないようにレーザー照射によって形成された複数の細線化溝と、を備え、前記金属安定化層および前記酸化物超電導層が、前記複数の細線化溝により複数のフィラメント導体を形成するように分割されており、前記複数の細線化溝のうちそれぞれの細線化溝において、前記細線化溝の溝開口部の幅が、前記細線化溝の溝底部の幅と同等以上である。

明 細 書

発明の名称： 酸化物超電導導体およびその製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、酸化物超電導導体およびその製造方法に関する。

本願は、2013年5月28日に、日本に出願された特願2013-112183号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 希土類系（RE123系）の酸化物超電導線材は、テープ状の金属基材上に中間層を介して酸化物超電導層と金属安定化層を積層した構造を有する。このため、交流損失を低減するためには、酸化物超電導層を細分化してマルチフィラメント構造を形成する必要がある。

これまで、希土類系の酸化物超電導線材からマルチフィラメント構造を形成するには、線材表面に貼り付けたマスキングテープに弱い出力のレーザーを照射し、マスキングテープを部分的に除去し、残ったマスキングテープを介しAgからなる金属安定化層と酸化物超電導層とに2段階の化学エッチングを施していた。この化学エッチングにより細線化溝を複数形成することにより、安定化層と酸化物超電導層とを任意の数に分断し、複数の超電導フィラメントを有するマルチフィラメント構造に形成することができる。

[0003] しかし、エッチングにより細線化溝を形成する方法では、溝幅を低減することに限界があり、超電導フィラメントの縁部にオーバーエッチング領域が生じ易い。このような理由により、臨界電流の低下するおそれおよび超電導フィラメントが剥離するおそれがあるなどの問題があった。

具体的には、化学エッチングの過程において酸化物超電導層に形成した細線化溝が金属安定化層に形成した溝よりも広がってしまうため、酸化物超電導層に形成する有効溝幅を100 μ m以下にするのが極めて困難であった。

また、上述のマスキングテープとレーザー照射と化学エッチングとの組み合わせによるマルチフィラメント構造の酸化物超電導線材の製造方法は、金

属安定化層がA gである場合に限られている。例えば、酸化物超電導線材において最も一般的に用いられているC uの安定化層を用いた場合、酸化物超電導線材が腐食されることなくC uに対して有効なエッチング液が現状で見つっていない。このため、エッチングによりC uを部分的に除去して細線化溝を形成することはできなかった。

[0004] また、酸化物超電導層をレーザー照射により分断し、マルチフィラメント構造の酸化物超電導導体を形成する技術として、以下の特許文献1に記載のように、酸化物超電導層の長手方向に沿って、レーザー光を酸化物超電導層に集光照射し、酸化物超電導層を酸化物超電導層の幅方向に複数に分断する技術が知られている。

特許文献1に記載の技術によれば、レーザー光を酸化物超電導層に集光照射するとともにパージガスにより細線化溝内の溶融物を吹き飛ばすことで、酸化物超電導層を分断した構造のマルチフィラメント線材を製造できると記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：日本国特開2007-141688号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] なお、レーザー照射のみで酸化物超電導層を分断する（スクライビングする）方法について、ドイツのK I T（カールスルーエ工科大学）が2012年に報告している。しかしながら、K I Tの報告においては、遠赤外線領域（1030nm）のファイバーレーザーを用いているため、熱加工となっており、分割後の超電導フィラメントにおいて臨界電流の低下が生じている。また、ドイツのK I Tはpsec（ピコ秒）レーザーを用いて熱加工による劣化の影響を低減しようと研究している。しかしながら、このpsecレーザーは、レーザー光を集光したスポット領域において中心の光強度分布が強

く、周辺に行く程、光強度分布が弱くなるといったファイバーレーザーおよび固体レーザー特有の光強度分布（ガウシアン分布）を有している。このため、レーザー光のスポット領域の中心に向かって切削深度が深くなっている。つまり、レーザー光のスポット領域の中心からエッジ部分まで均一な深さで切削することができない。そのため、酸化物超電導層を分割する細線化溝を形成すると、細線化溝の深さが一定とならないこととなり、超電導フィラメント間の絶縁抵抗として望ましい値を得ることができない問題があった。また、psecレーザーを用いて熱加工による劣化の影響を低減しつつ酸化物超電導層を分断する方法では、20～30回のレーザー照射で目的の細線化溝を形成する技術であり、生産性が悪い。また、この方法であっても加工後に臨界電流が40%程度劣化すると公表されている。

[0007] また、特許文献1の記載においても、レーザー光のスポット領域の中心から周辺領域にかけて均一な深さに酸化物超電導層を掘削することができないため、酸化物超電導層を完全に分割するためには、酸化物超電導層と中間層とを通過して基材まで到達する深さを有する細線化溝を形成する必要があると記載されている。しかしながら、希土類系酸化物超電導線材の基材は、Ni系の高強度かつ高融点の合金から構成されている。このため、基材まで達する細線化溝を形成すると細線化溝の内側に必然的に残留する溶融凝固物は、基材と中間層と酸化物超電導層との構成元素の混合された導電性の溶融凝固物となる。このため、細線化溝を介し隣接する超電導フィラメント間の絶縁抵抗を高くするという目的を達成することができない問題を有していた。

[0008] このため、特許文献1に記載の技術では、溶融凝固物を高温（400～800℃）に加熱し、酸化することで抵抗を高くする技術について開示している。しかしながら、Ni系の高融点合金成分を多く含む溶融凝固物を酸化させるために、上述の温度範囲で溶融凝固物を加熱すると、酸化物超電導層の超電導特性を劣化させる問題がある。

また、Ni系の高融点合金成分を多く含む溶融凝固物の全体を酸化させることはできず、溶融凝固物の表面部分のみが酸化する。そのため、Ni合金

からなる基材を介し、表面酸化物の内側で金属同士が接続し、隣接する超電導フィラメント間に電流パスができてしまう。そのため、超電導フィラメント間の絶縁抵抗を高くすることができない問題を有していた。特許文献1に記載の例では、熱処理後の抵抗値において25～210Ωの抵抗が得られたと記載されているが、超電導フィラメント間の絶縁抵抗として高い値は得られていない。

[0009] 以上の背景に鑑み本発明者らは、細線化溝を形成するために用いるレーザー光の種類、レーザー光の位相調整、偏光状態制御、光学マスク制御、レーザー光の照射領域における強度分布などについて種々研究を重ねた。この結果、一般的に溶断に用いるYAGレーザーおよび連続波レーザーなどの熱溶融型のレーザー光は、レーザー光のスポット領域においてレーザー光の強度分布を均一化することができず、スポット領域の中心においてガウシアン成分の強度が高いことが判明した。このことは、仮に光学マスクによって長方形のビームを作り出しても、レーザー光のスポット領域の中心部に極めてレーザー強度の高い領域が発生し易いので、酸化物超電導線材に基材まで到達する深い細線化溝を必然的に形成してしまう要因となる。また、これらの固体レーザーは、ビーム整形を行った領域の周辺部分に強いコヒーレント光成分が発生し易いので、このコヒーレント光成分の影響によりレーザー光の強度を均一化できない問題もある。

なお、固体レーザーではないガスレーザーの1種として、CO₂レーザーが知られているが、CO₂レーザーは連続波レーザーであり、また、波長が10μmに及ぶ。そのため、光学系のレンズを究極の開口数：NA=1に設計できたとして、加工精度はλ/NA（λ：波長）で決まるので、10μm未満の加工は不可能な問題がある。

[0010] 例えば、希土類系の酸化物超電導線材の製造方法においては、テープ状の金属製の基材上に厚さ数nm～数100nmレベルの複数の層を積層した中間層を介し厚さ1μm～数μmレベルの酸化物超電導層を成膜し、厚さ数μmレベルのAgの保護層を成膜して、酸化物超電導線材が得られる。この構

造の酸化物超電導線材に対し上述のようにビーム整形を行ったレーザー照射領域におけるレーザー光の強度を均一化できないレーザー光を用いて細線化溝を形成する場合において、酸化物超電導層を完全に分断する深さを有する細線化溝を加工するためには、基材に達する深さを有する細線化溝を形成してしまう問題がある。

[0011] 本発明は、上記従来の実情に鑑みなされたものであり、酸化物超電導層を細線化溝により複数のフィラメント導体を形成するように分割した構造において隣接するフィラメント導体間の高い絶縁抵抗を確保することができ、交流損失を低減した酸化物超電導導体を得ることができる技術の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 以上の背景から、本発明者らは、レーザー照射領域においてより均一な強度分布を有するレーザー光について研究した結果、ガスレーザーであり、無偏光状態のレーザーの1種であるエキシマレーザーに着目し、エキシマレーザーを用いて細線化溝を形成する研究を行った。

この研究の結果、エキシマレーザーのような紫外線領域のレーザーにより細線化溝を形成する場合、酸化物超電導層を超えて中間層に達する深さであって基材まで到達しない深さを有する細線化溝を形成できることを見出した。また、紫外線領域のレーザー光を用いる場合、ファイバーレーザー等を用いる熱溶融型の溶断ではなく、分断する層の分子構造自体を切断するように光分解反応が行われ、分断する層の特性を損なうことなく精度の高い分断を行えることも見出した。

また、酸化物超電導層を超えて中間層に達する深さであって基材まで到達しない深さを有する細線化溝を形成すると、細線化溝を介し隣接したフィラメント導体間の絶縁抵抗が飛躍的に向上することを見出し、本願発明に到達した。

[0013] 上記課題を解決するため、本発明の第一態様に係る酸化物超電導導体は、金属製の基材と、前記基材上に設けられた絶縁性の中間層と、前記中間層上

に設けられた酸化物超電導層と、前記酸化物超電導層上に設けられた金属安定化層と、前記基材の長手方向に沿って前記金属安定化層と前記酸化物超電導層とを分断し、前記金属安定化層から前記酸化物超電導層を介して前記中間層の内部に達し、前記基材に到達しない複数の細線化溝と、を備え、前記金属安定化層および前記酸化物超電導層が、前記複数の細線化溝により複数のフィラメント導体を形成するように分割されており、前記複数の細線化溝のうちそれぞれの細線化溝において、前記細線化溝の溝開口部の幅が、前記細線化溝の溝底部の幅と同等以上である。

また、上記態様に係る酸化物超電導導体は、前記細線化溝は、前記細線化溝の溝壁部分が前記中間層および前記酸化物超電導層の構成元素から形成された絶縁性の被覆層により覆われ、前記被覆層と前記溝底部とが絶縁性となるように、レーザー照射によって形成されていてもよい。

[0014] 上記態様に係る酸化物超電導導体は、金属安定化層、酸化物超電導層、および中間層の内部までを分断し、金属製の基材に到達しない深さを有する細線化溝を有することによって、酸化物超電導層が分断されたフィラメント導体を構成している。そのため、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間において、非常に高い抵抗が得られる。

また、上記態様に係る酸化物超電導導体は、エッチングを用いることなくレーザーのみの加工によりフィラメント導体が形成されている。そのため、フィラメント導体のオーバーエッチングの影響が無くなり、フィラメント導体の剥離強度が高く、臨界電流の低下が少ないフィラメント導体を備えた酸化物超電導導体を得られる。

上記態様に係る酸化物超電導導体において、細線化溝の溝壁部分が中間層および酸化物超電導層の構成元素から形成される高い抵抗の被覆層により覆われている構造である場合、基材を構成する成分の混入は起こらない。そのため、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間において高い絶縁抵抗を得ることができる。

[0015] 上記態様に係る酸化物超電導導体は、前記溝底部の溝幅が $5\ \mu\text{m}$ 以上 10

0 μm 以下であってもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体においては、エッチングを用いることなくレーザー光の集光照射のみで細線化溝が形成される。そのため、エッチングにより生じるオーバーエッチングの影響を無くすることができる。また、レーザー光を酸化物超電導線材に集光照射して形成する際のレーザー光のレーザー照射領域の形成精度に対応した、高い精度で5～100 μm 幅の細線化溝を形成することができる。

上記態様に係る酸化物超電導導体は、前記複数のフィラメント導体において、前記細線化溝を介し隣り合うフィラメント導体間の抵抗が1 M Ωcm 以上であってもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体においては、細線化溝の底部が基材に到達せずに中間層に位置する深さを有する細線化溝が形成されている。そのため、基材まで達する細線化溝を形成する技術では得られないような高いフィラメント導体間抵抗を示す酸化物超電導導体を得られる。

[0016] 上記態様に係る酸化物超電導導体は、前記中間層が、高結晶配向性を有する配向層と、前記配向層の上に形成されたキャップ層と、を備え、前記溝底部が前記キャップ層内に位置するように形成され、前記溝底部において、前記キャップ層の一部が露出するように前記細線化溝が形成されていてもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体においては、細線化溝の底部が中間層のうち、キャップ層に位置するように細線化溝を形成することにより、細線化溝の底部がキャップ層内に形成されて、基材に到達しない細線化溝を形成できる。キャップ層内に位置するように形成された細線化溝によりフィラメント導体を分割しているので、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間の高い絶縁抵抗を得ることができる。

[0017] 前記課題を解決するため、本発明の第2態様に係る酸化物超電導導体の製造方法は、金属製の基材と、前記基材上に設けられた絶縁性の中間層と、前記中間層上に設けられた酸化物超電導層と、前記酸化物超電導層上に設けら

れた金属安定化層と、を備えた酸化物超電導線材を準備し、前記金属安定化層の上方から紫外線領域のレーザーを前記酸化物超電導線材に集光照射することにより、前記金属安定化層と前記酸化物超電導層とを分断し、前記中間層の内部まで到達し、前記基材には到達しないように、それぞれの細線化溝の溝開口部の幅が前記細線化溝の溝底部の幅より大きくなるように、前記基材の長手方向に沿った複数の細線化溝を前記酸化物超電導線材に形成することによって前記酸化物超電導層を複数のフィラメント導体を形成するように分割する。

[0018] 上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法においては、紫外線領域のレーザーを集光照射して、金属安定化層と酸化物超電導層とを介し中間層まで達する深さを有する細線化溝を形成することで酸化物超電導層を分断した構造を有し、複数のフィラメント導体を形成することができる。各フィラメント導体は、中間層まで達する深さを有する細線化溝により分断され、細線化溝の底部には絶縁性の中間層が存在するため、フィラメント導体間の絶縁性が高い酸化物超電導導体を得ることができる。

上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法は、前記細線化溝の溝壁部を前記中間層および前記酸化物超電導層の構成元素から形成される絶縁性の被覆層により覆っていてもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法においては、各フィラメント導体が、中間層まで達する深さを有する細線化溝により分断される。細線化溝の底部には絶縁性の中間層が存在する。更に、酸化物超電導層および中間層の構成元素から形成される絶縁性の高い被覆層で溝壁部分が覆われている。これによって、フィラメント導体間の高い絶縁性を確保することができる。

[0019] 前記課題を解決するため、上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法は、前記紫外線領域のレーザーとして、集光部分先端のレーザー強度分布が平坦なトップハット型の強度分布を有するレーザー波長380nm以下のレーザーを用いてもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法においては、集光部分先端のレ

レーザー強度分布が平坦なトップハット型の強度分布を有するレーザーを用いるため、レーザーによる細線化溝の切削深度を均一化できる。このため、酸化物超電導層を確実に分断しながら、確実に細線化溝の底部を中間層に位置するように形成することができ、基材に達していない細線化溝を形成することにより、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間の優れた絶縁性を確保することができる。

[0020] 前記課題を解決するため、上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法は、前記レーザーを前記金属安定化層の外側から集光照射するとともに、アシストガスを前記金属安定化層に供給して、前記金属安定化層のレーザー集光照射部分を溶融除去し、前記酸化物超電導層および前記中間層に前記レーザーを集光照射して、前記酸化物超電導層のレーザー集光照射部分と前記中間層のレーザー集光照射部分とを溶融除去して前記細線化溝を形成し、前記溝壁部分を前記被覆層で覆ってもよい。

上記態様に係る酸化物超電導導体の製造方法においては、レーザーにより金属安定化層を部分的に溶融し、アシストガスにより金属安定化層の溶融部分を除去することで金属安定化層上に細線化溝の上部を形成する。この後に前記細線化溝の上部より酸化物超電導層および中間層を部分的に溶融し、アシストガスにより酸化物超電導層の溶融部分および中間層の溶融部分を除去することで細線化溝の底部を形成することができる。レーザーにより酸化物超電導層および中間層を溶融させた状態においては、既に酸化物超電導層の上に位置する金属安定化層の溶融部分を除去している。そのため、酸化物超電導層および中間層に形成される細線化溝の溝壁部分には酸化物超電導層および中間層の構成元素から形成される絶縁性の被覆層が残留する。また、金属安定化層に形成されている細線化溝の上部についても溝壁部分は酸化物超電導層および中間層の構成元素から形成される被覆層に覆われるので、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間の絶縁性を特に良好にすることができる。

発明の効果

[0021] 上記第一態様および第二態様によれば、金属安定化層、酸化物超電導層、および中間層までを分断し、基材に到達しない深さを有する細線化溝により酸化物超電導層が分断され、フィラメント導体が構成されている。このため、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間において、非常に高い絶縁抵抗が得られる。特に、細線化溝の溝壁部分は中間層および酸化物超電導層の構成元素から形成される高い絶縁抵抗の被覆層により覆われ、細線化溝の底部は中間層の構成元素が存在しているため、基材を構成する成分の混入は起こらない。そのため、細線化溝を介し隣接するフィラメント導体間において高い絶縁抵抗が得られる。

また、エッチングを用いることなくレーザーのみの加工により細線化溝が形成されるので、オーバーエッチングの影響を無くすることができる。さらに、フィラメント導体の剥離強度が高く、臨界電流の低下が少ないフィラメント導体を備えた酸化物超電導導体を提供できる。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]本発明の実施形態に係る酸化物超電導線材に細線化溝を形成し複数のフィラメント導体を形成して形成される酸化物超電導導体の一例を示す斜視図である。

[図2]本発明の実施形態に係る酸化物超電導導体を部分的に示す断面図である。

[図3]本発明の実施形態に係る細線化溝を形成する前の酸化物超電導線材の一例を示す斜視図である。

[図4]本発明の実施形態に係る細線化溝を形成する場合に用いるレーザー加工装置の一例を示す構成図である。

[図5]本発明の実施形態に係る酸化物超電導線材に対しレーザー光を照射して細線化溝を形成する方法を工程順に示す。図5（a）は加工前の酸化物超電導線材を示す斜視図である。図5（b）は金属安定化層を除去した状態を示す斜視図である。図5（c）は酸化物超電導層を除去している状態を示す斜視図である。図5（d）は中間層の一部まで除去した状態を示す斜視図であ

る。

[図6]本発明の実施形態に係る細線化溝を形成するために用いるレーザーのビーム強度分布を示す図である。図6 (a) はエキシマレーザーのビーム強度分布を示す模式図である。図6 (b) はYAGレーザーのビーム強度分布を示す模式図である。

[図7]実施例において酸化物超電導線材に形成された細線化溝の一例を示す電子顕微鏡写真である。

[図8]実施例における細線化溝の断面構造を部分的に示す拡大写真である。

[図9]比較例におけるエッチングにより得られた細線化溝を有する酸化物超電導導体に形成されたオーバーエッチング部分と前記オーバーエッチング部分とを示す拡大写真である。

[図10]実施例で得られた酸化物超電導導体の一例についてヒステリシス損失を測定した結果を示すグラフである。

[図11]実施例において酸化物超電導導体に形成された細線化溝の他の例について、細線化溝の一部に対しFIB（収束イオンビーム装置）を用いて細線化溝周辺のフィラメントの断面観察用試料を切り出し、EPMA（電子線マイクロアナライザー）を用いて切り出された試料を分析した結果を示す説明図である。

[図12]実施例で得られた酸化物超電導導体の一例試料（試料番号3）の剥離強度と、比較例でエッチングにより得られた酸化物超電導導体試料（試料番号1, 2）の剥離強度とを対比して示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0023] 以下、本発明の実施形態に係る酸化物超電導導体について図面に基づき説明する。

図1は細線化溝を形成し複数のフィラメント導体を形成した本発明の実施形態に係る酸化物超電導導体の一例を示す斜視図であり、図2は本実施形態に係る酸化物超電導導体を部分的に示す断面構造図である。本実施形態の酸化物超電導導体Aは、図3に示す構造の酸化物超電導線材Bを、図4に示す

レーザー加工装置Cにより加工することにより製造される。なお、各図に示す酸化物超電導導体Aおよび酸化物超電導線材Bは、本実施形態の特徴をわかりやすくするため、要部となる部分を拡大して示している場合があり、各構成要素の寸法比率などが実際と同じであるとは限らない。

[0024] 図3に示す加工前の酸化物超電導線材Bは、基材2上に積層された中間層5と、中間層5上に積層された酸化物超電導層6と、酸化物超電導層6上に積層された金属安定化層7より構成されている。

前記基材2は、長尺とするためにテープ状であることが好ましく、ハステロイ（米国ヘインズ社製商品名、登録商標）に代表されるニッケル合金などの耐熱性に優れた高強度の金属材料から形成される。なかでも、ハステロイとして、モリブデン、クロム、鉄、コバルト等の成分量が異なる、ハステロイB、C、G、N、W等のいずれの種類も使用できる。また、基材2として、ニッケル合金に集合組織を導入した配向Ni-W合金テープ基材を適用することもできる。基材2の厚さは、目的に応じて適宜調整すれば良く、10～500 μ mの範囲とすることができる。

[0025] 前記中間層5の構造としては、一例として拡散防止層5Aと配向層5Bとキャップ層5Cとを備えた構造を例示することができる。

前記拡散防止層5Aは、基材2の構成元素拡散を防止する目的で形成され、窒化ケイ素（Si₃N₄）、酸化アルミニウム（Al₂O₃）、GZO（Gd₂Zr₂O₇）等から構成され、スパッタ法などの成膜法により例えば厚さ10～400nmに形成される。

また、拡散防止層5Aの上にベッド層を形成することもできる。このベッド層は、耐熱性が高く、界面反応性を低減させ、ベッド層の上に形成される膜の配向性を得るために用いる。ベッド層は、Y₂O₃、Er₂O₃、CeO₂、Dy₂O₃、Er₂O₃、Eu₂O₃、Ho₂O₃、La₂O₃等から形成される。ベッド層は、スパッタリング法等の成膜法により形成され、その厚さは例えば10～100nmである。

[0026] 配向層5Bは、配向層5Bの上に形成されるキャップ層5Cの結晶配向性

を制御するために2軸配向する物質から形成される。配向層5Bの材質として具体的には、 $Gd_2Zr_2O_7$ 、 MgO 、 $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ)、 $SrTiO_3$ 、 CeO_2 、 Y_2O_3 、 Al_2O_3 、 Gd_2O_3 、 Zr_2O_3 、 Ho_2O_3 、 Nd_2O_3 等の金属酸化物を例示することができる。

この配向層5BをIBAD (Ion-Beam-Assisted Deposition) 法により良好な2軸配向性 (高結晶配向性) で成膜するならば、キャップ層5Cの結晶配向性を良好にすることができる (高結晶配向性を有するキャップ層5Cが得られる)。さらに、キャップ層5Cの上に成膜する酸化物超電導層6の結晶配向性を良好にして (高結晶配向性を有する酸化物超電導層6が得られ)、優れた超電導特性を発揮できる。

キャップ層5Cは、上述の配向層5Bの表面に成膜されて結晶粒が面内方向に自己配向し得る材料から形成され、具体的には、 CeO_2 、 Y_2O_3 、 Al_2O_3 、 Gd_2O_3 、 ZrO_2 、YSZ、 Ho_2O_3 、 Nd_2O_3 、 $LaMnO_3$ 等から形成される。

キャップ層5Cに用いる CeO_2 層は、PLD法 (パルスレーザー蒸着法)、スパッタリング等により大きな成膜速度で形成でき、良好な結晶配向性を得ることができる。キャップ層5Cの膜厚は50~5000nm、好ましくは300~800nm程度の範囲に形成できる。

[0027] 酸化物超電導層6の材質としては、高温超電導体に用いられる公知の材料が採用され、具体的には、 $REBa_2Cu_3O_y$ (REはSc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、およびLuのうち、1種または2種以上の希土類元素を示す。) のような材質を例示できる。この酸化物超電導層6として、 $Y123$ ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$) 又は $Gd123$ ($GdBa_2Cu_3O_{7-x}$) などを例示できる (組成式中のxは酸素欠損を表す。)。

酸化物超電導層6は、スパッタ法、真空蒸着法、レーザー蒸着法、電子ビーム蒸着法、化学気相成長法 (CVD法) 等の物理的蒸着法、熱塗布分解法 (MOD法) 等で中間層5上に積層することができる。酸化物超電導層6の

形成に関しては、生産性の観点から、PLD（パルスレーザー蒸着）法、TFAMOD法（トリフルオロ酢酸塩を用いた有機金属堆積法、塗布熱分解法）、又はCVD法を用いることができる。

[0028] 金属安定化層（保護層）7はAgまたはAg合金などの良電導性かつ酸化物超電導層6と接触抵抗が低く親和性の高い層として形成される。なお、金属安定化層7をAgから構成する理由として、酸化物超電導層7に酸素をドーピングする酸素アニール工程において、酸素を酸化物超電導層7に透過し易くする点を挙げることができる。成膜法により製造する酸化物超電導層の母物質は絶縁体であるが、酸素アニール処理により酸素を取り込むことで結晶構造の整った酸化物超電導層が形成され、超電導特性を示す。金属安定化層7を成膜するには、スパッタ法などの成膜法を採用し、金属安定化層7の厚さを1～30 μ m程度に形成できる。

[0029] なお、図3には描かれていないが、金属安定化層7を第1の金属安定化層7として金属安定化層7の上に第2の金属安定化層を設けても良い。第2の金属安定化層は、銅、Cu-Zn合金、Cu-Ni合金等の銅合金、アルミニウムまたはアルミニウムの合金、ステンレス等の比較的安価な導電性の金属材料から形成されることが好ましい。第2の金属安定化層は、酸化物超電導層6が超電導状態から常電導状態に転移しようとした時、第1の金属安定化層7とともに、酸化物超電導層6の電流を転流するバイパスとして機能する。また、酸化物超電導導体Aを超電導限流器に使用する場合、安定化層は、常電導転移が起こり常電導状態に転移した時に発生する過電流を瞬時に抑制するために用いられる。この用途の場合、第2の金属安定化層に用いられる材料は、例えば、Ni-Cr等のNi系合金等の高抵抗金属が挙げられる。第2の金属安定化層の厚さは例えば10～300 μ mとすることができる。

[0030] 図1、図2に示す構造の酸化物超電導導体Aは図3に示す酸化物超電導線材Bの酸化物超電導層6を分断するように複数の細線化溝8を酸化物超電導層6の長手方向に沿って酸化物超電導層6の幅方向に複数形成することによ

り製造される。図 1 では酸化物超電導線材 B の幅方向に等間隔で形成された 3 本の細線化溝 8 により酸化物超電導層 6 が 4 つのフィラメント導体 10 に分断された構造を例示している。

細線化溝 8 は、金属安定化層 7 および酸化物超電導層 6 を金属安定化層 7 および酸化物超電導層 6 の厚さ方向に貫通し、細線化溝 8 の底部 8 a が中間層 5 の途中に位置するように形成されている（細線化溝 8 の底部 8 a が酸化物超電導線材 B の厚さ方向において中間層 5 に位置するように形成されている）。本実施形態において細線化溝 8 の底部 8 a は詳細には中間層 5 の一部であるキャップ層 5 C まで達するように形成されている（細線化溝 8 は、底部 8 a が中間層 5 の一部であるキャップ層 5 C に位置するように形成されている）。なお、細線化溝 8 の底部 8 a は配向層 5 B、拡散防止層 5 A には達していない状態でキャップ層 5 C の底部領域に位置していることが好ましい。

[0031] この理由は、一般的な酸化物超電導線材 B の構造において、酸化物超電導層 6 の下に形成する拡散防止層 5 A と配向層 5 B とキャップ層 5 C との内、キャップ層 5 C が厚くなるように形成された構造が多いことに関連している。例えば、酸化物超電導線材 B において、拡散防止層 5 A を数 10 nm ～ 100 nm 程度、配向層 5 B を 5 ～ 10 nm 程度、およびキャップ層 5 C を 200 ～ 500 nm 程度に形成することが知られている。

このことは、以下の（１）～（３）の理由のためである。

（１）２軸配向した配向層 5 B を形成するために用いる I B A D 法の成膜レートが低く、配向層 5 B を成膜するために、例えば現状の技術において、MgO の配向層 5 B では 5 ～ 10 nm 程度の薄い膜厚で 2 軸配向した膜が得られること。

（２）基材 2 からの熱拡散による元素の移動を抑制して酸化物超電導層 6 に元素拡散の影響を及ぼさないようにするためには、拡散防止層 5 A として数 10 nm ～ 100 nm 程度の膜厚が必要であること。

（３）２軸配向した配向層 5 B 上に、優れた結晶配向性のキャップ層 5 C を

得るためには、キャップ層 5 C の膜厚として数 100 nm 程度の厚さが必要であること。

上記 (1) ~ (3) の事項を勘案すると、キャップ層 5 C の範囲内に位置するように細線化溝 8 の底部 8 a を形成し、細線化溝 8 を基材 2 まで到達させない構造が望ましい構造となる。

なお、基材 2 上に拡散防止層 5 A と配向層 5 B とを形成した構造に替えて、配向 Ni-W、配向 Ni および配向 Cu に Ni を成膜した金属基材を用いることができる。このため、これらのテープ材の上にキャップ層 5 C を形成し、キャップ層 5 C の上に酸化物超電導層 6 と金属安定化層 7 とを積層して酸化物超電導導体を構成することもできる。これら酸化物超電導導体の構造において、キャップ層 5 C の内部まで到達する深さを有する細線化溝 8 を形成し、細線化溝 8 の溝底部がキャップ層 5 C の部分に位置するようにレーザーで加工することにより、目的の構造を得ることができる。

[0032] 細線化溝 8 は、細線化溝 8 の底部 8 a の幅よりも細線化溝 8 の開口部 8 b が溝幅の広い形状（上広がり形状）に形成され、酸化物超電導線材 B の幅方向に等間隔で複数形成されている。本実施形態では酸化物超電導線材 B の幅方向に細線化溝 8 が 4 本形成された状態を図示している。

酸化物超電導線材 B は一般的に幅 10 mm あるいは幅 5 mm 程度のテープ形状に形成される。そのため、細線化溝 8 は上述するレーザーを酸化物超電導線材 B に集光照射する領域（レーザー集光照射部分）の幅を考慮し、底部 8 a の幅として $5\ \mu\text{m}$ 以上、 $100\ \mu\text{m}$ 以下程度の幅に形成されていることが好ましい。また、細線化溝 8 において金属安定化層 7 を分断している溝部分の底部の幅を d_2 と規定し、酸化物超電導層 6 を分断している溝部分の底部の幅を d_1 と規定した場合、 $d_2 / d_1 \geq 1$ の関係を満足していることが好ましい。ここで、幅 d_2 は、基材 2 の上面と略平行な面であって、金属安定化層 7 の底面と酸化物超電導層 6 の上面とが接する面の位置における細線化溝 8 の溝幅である。また、幅 d_1 は、基材 2 の上面と略平行な面であって、酸化物超電導層 6 の底面と中間層 5 の上面とが接する面の位置における細

線化溝 8 の溝幅である。即ち、前記細線化溝 8 は溝底部に近い面の位置における幅 d_1 に対し、溝開口部に近い面の位置における幅 d_2 が同等以上となるような断面形状を有する溝を形成する。

細線化溝 8 の形状を $d_2 / d_1 \geq 1$ の関係を満足するように形成することが好ましい理由は以下の通りである。

従来方法のようにレーザー照射と化学エッチングを併用したスクライビング方法で細線化溝を作製すると、細線化溝で分断した超電導フィラメントの剥離強度が細線化溝形成前の剥離強度の半分程度に低下する傾向がある。その1つの原因としては、 $d_2 / d_1 < 1$ の場合、細線化溝の両内壁部分が細線化溝の内側に向かって傾斜するオーバーハング状態（突出部が形成された状態）となることが挙げられる。冷却時に液体窒素がこのオーバーハング部分に入り込んで膨張する。超電導導体の冷却の度に液体窒素の膨張が何度も続く場合、膨張した液体窒素により超電導フィラメントが剥離する方向に圧力が印加される。以上に述べたように、フィラメントの剥離が助長されることが超電導フィラメントの剥離強度の低下の一因と思われる。また、酸化物超電導線材を低温から常温に戻した場合に、上記内壁のオーバーハング部分に水分が浸入すると水分がオーバーハング部分から出てこられなくなる。オーバーハング部分に水分が浸入した状態で酸化物超電導線材を低温に冷却すると、オーバーハング部分内の水分が膨張して超電導フィラメントの剥離が生じるおそれもある。更に、 $d_2 / d_1 < 1$ の場合、酸化物超電導層の面積低下も大きくなり、臨界電流の損失が多くなる問題もある。

[0033] このため、酸化物超電導層 6 を酸化物超電導層 6 の厚さ方向に完全に分断した上で、基材 2 まで溝が到達しないようにレーザー光を酸化物超電導線材に集光照射して細線化溝 8 を形成するには、用いるレーザーをキャップ層 5 C の厚さ方向の途中で止めるように加工条件を設定することが好ましい。なお、このようにキャップ層 5 C の厚さ方向の途中で細線化溝 8 を止めるようにレーザーにより加工するためには、紫外線領域の波長を有するレーザーを用いることが好ましい。また、前記紫外線領域の波長を有するレーザーとし

ては、レーザーが集光照射される酸化物超電導線材のビームの照射領域に、できる限り均一なエネルギーを照射できるようなトップハット型のエキシマレーザーを用いることが好ましい。このエキシマレーザーにより分断する条件を規定することで溝が基材 2 にまで到達していないような、キャップ層 5 C の途中に細線化溝 8 の溝底部 8 a が形成された構造を得ることができる。さらに、酸化物超電導層 6 を完全に分断できる細線化溝 8 を形成できる。なお、エキシマレーザーによる分断の状況によってはキャップ層 5 C を若干超えて配向層 5 B あるいは拡散防止層 5 A まで細線化溝 8 が到達してもよいが、細線化溝 8 の底部 8 a は基材 2 にまでは到達していないことが好ましい。

[0034] 前記細線化溝 8 の溝壁部分には、酸化物超電導層 6 とキャップ層 5 C とを構成する元素の溶融凝固物により形成された被覆層 9 が形成されている。この被覆層 9 は、被覆層 9 の上部で細線化溝 8 の幅方向両端に位置する金属安定化層 7 の端面 7 a を覆う。さらに、前記被覆層 9 は、前記端面 7 a よりも細線化溝 8 の低い部分である酸化物超電導層 6 の端面 6 a を覆うとともに、更に下端で細線化溝 8 の底部 8 a における幅方向端縁の内縁部 8 e を覆うように、これらの端面 7 a、端面 6 a、および内縁部 8 e に一体的に被覆されている。

[0035] 後に詳述するように安定化金属層 7 の上方から紫外線領域のレーザー（例えば、波長 248 nm のパルスエキシマレーザー光）を酸化物超電導線材に集光照射して細線化溝 6 を形成する場合、前記被覆層 9 は、レーザー照射と同時に形成途中の細線化溝 8 にアシストガスを噴射して溶融物を吹き飛ばして除去しつつ形成されている。このため、最初にレーザーによって A g の金属安定化層 7 を分断した際、アシストガスにより最初に A g がほとんど除去される。その後、レーザー照射によって酸化物超電導層 6 および中間層 5 を分断すると、酸化物超電導層 6 および中間層 5 の層が溝型に除去されるが、細線化溝 8 の底部を形成している間、酸化物超電導層 6 の構成元素と中間層 5 の構成元素とが酸化物超電導線材の分断が進行するに伴い順次除去されてゆく。

この場合、レーザー光の照射に伴い、酸化物超電導層 6 の構成元素と中間層 5 の構成元素とが主体となって細線化溝 8 の内壁面に順次堆積するので、酸化物超電導層 6 および中間層 5 の構成元素を主体として形成される被覆層 9 を細線化溝 8 の両内壁部分に被覆層 9 として形成することができる。なお、図 1 に示すように金属安定化層 7 の底部において細線化溝の部分には金属安定化層 7 の構成元素の溶融物が若干酸化物超電導層 6 の端面に溶出して形成された部分被覆層 7 A が形成されている。この部分被覆層 7 A を含めて金属安定化層 7 の端面 7 a と酸化物超電導層 6 の端面 6 a とを覆って被覆層 9 が細線化溝 8 の両壁部分を覆うように延在されている。

[0036] 図 4 は、図 3 に示す構造の酸化物超電導線材 B に対しレーザー光を集光照射して、図 1 および図 2 に示す構造の酸化物超電導導体 A を製造するためのレーザー加工装置 C の概要を示す図である。図 4 のレーザー加工装置 C は、エキシマレーザーの発生装置 15 と、前記発生装置 15 から発生されるエキシマレーザーを案内する筒型の案内部 16 と、前記案内部 16 の下部に接続されたノズル体 17 と、前記ノズル体 17 の一部に接続されたアシストガスの供給源 18 と、を主体として構成されている。

なお、レーザーの発生装置 15 には、紫外線領域（波長 380 nm 以下）のレーザーであるエキシマレーザーを発生する装置を用いてもよい。また、光学系を調整して、レーザー光のパワー強度分布をトップハット型にした 3 倍高調波の YAG レーザーを用いても良い。

なお、レーザーの加工精度は λ / NA （ λ ：波長、 NA ：開口数）で決定されるので、波長はできるだけ短い波長が有利である。また、レーザーに求められることは、レーザー光のパワー強度分布がトップハット型であること、高出力であることである。これらにより、レーザー照射 1 回あたりの長方形のビームの幅を広げられる利点があり、酸化物超電導線材の加工速度を速くできる。なお、YAG レーザーを用いて出力が弱くなる場合には、レーザーによる酸化物超電導線材の切削回数を多くして対応することが可能である。

[0037] 案内部 16 の内部には、発生装置 15 から導かれたエキシマレーザー光をノズル体 17 の先端において適切なビーム径に絞るための複数の光学レンズを備えた光学装置 20 が備えられている。

前記光学装置 20 は、前記光学装置 20 に備えられた光学レンズおよび光学マスク等の相互位置調節を行うことによりエキシマレーザーのビーム径を絞って任意の大きさを有する領域にレーザービームを集光させ、目的の大きさを有する照射領域を形成することができる。また、前記光学装置 20 は、ノズル体 17 に接続されたアシストガスの供給源 16 からノズル対 17 に、ヘリウムガス、窒素ガス、アルゴンガス、または空気などのアシストガスを所望の噴出量で供給することができる。さらに、前記光学装置 20 は、ノズル体 17 の先端からレーザービームの照射位置にアシストガスを供給しつつレーザー加工ができるように構成されている。

[0038] なお、ノズル体 17 の先端は、図 4 に示すように加工すべき水平支持した酸化物超電導線材 B に対し、真上からレーザー光を集光照射することができるように構成されている。さらに、ノズル体 17 の先端は、酸化物超電導線材 B のレーザー照射位置（レーザー照射部分）に対して真上から（酸化物超電導線材 B に対し約 90° の角度から）アシストガスを噴射し、レーザービームにより加工した領域に存在する溶融物を吹き飛ばして除去できるように構成されている。なお、ノズル体 17 を支持するスタンドには図示しない角度調整機構が備えられていて、ノズル体 17 の先端からレーザー光を照射する位置に対し、約 90° の照射角度を形成するように真下向きにアシストガスを噴出するか、所定の角度で斜め向きにアシストガスを噴出するかを選択できる構成が好ましい。

[0039] レーザー加工装置 C を用いて図 3 に示す構造の酸化物超電導線材 B を加工するには、酸化物超電導線材 B を送出リールに巻き付けておき、前記送出リールから酸化物超電導線材 B を水平に繰り出し、酸化物超電導線材 B を巻取りリールに巻き取る。さらに、酸化物超電導線材 B を送出リールから繰り出した状態で、金属安定化層 7 を上になるように配置して、水平に支持した酸化

物超電導線材 B の上からレーザー光を酸化物超電導線材 B に集光照射する。この場合、光学装置 20 の光学レンズや光学マスク等を調整することにより、レーザー光の照射領域（レーザー集光照射部分）が径 $5\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 程度になるようにレーザーを集光する。さらに、酸化物超電導線材 B を送出力リールから巻取りリールに向けて一定の速度で移動させることにより、酸化物超電導線材 B の酸化物超電導層 6 を分断する細線化溝 8 を酸化物超電導線材 B の長手方向に沿って形成する。ここで、レーザー光を集光照射する領域（レーザー集光照射部分）を光学マスクまたはシリンドリカルレンズを用いて、長方形状、楕円形状、または円形状に調整することができる。また、レーザーとしては、レーザー光の強度分布が前記照射領域において均一であってビームエッジでの干渉性の少ない紫外線領域のパルスレーザー光、例えば、パルスエキシマレーザーを用いることが好ましい。

[0040] 次に、酸化物超電導線材 B を加工する方法の一例について図 5（a）～（d）を基に以下に説明する。

図 5（a）に示す酸化物超電導線材 B の金属安定化層 7 にレーザー光を集光照射すると、酸化物超電導線材 B の移動に伴い、金属安定化層 7 はレーザー光を集光したレーザー照射領域の幅に沿って順次酸化物超電導線材 B の長さ方向に切削される。そして、細線化溝の上部 8 A が形成される。

次に、図 5（b）～（c）に示すように、金属安定化層 7 の下に位置する酸化物超電導層 6 にレーザー光を集光照射すると、酸化物超電導線材 B の移動に伴い、レーザー光を集光した領域の幅に沿って酸化物超電導層 6 とキャップ層 5 C が順次酸化物超電導線材 B の長さ方向に切削される。そして、細線化溝の底部 8 B が形成される。これにより、図 5（d）に示すように、金属安定化層 7 と酸化物超電導層 6 とキャップ層 5 C まで達し、各酸化物超電導層 6 を分断するような細線化溝 8 が形成される。この結果、酸化物超電導層 6 は細線化溝 8 により分断されて、細線化溝 8 の両側にフィラメント導体 10 が形成される。

[0041] ここで、金属安定化層 7 に細線化溝 8 の上部 8 A を形成した状態でアシス

トガスを供給することにより、熔融した Ag をほとんど吹き飛ばして除去することができる。また、金属安定化層 7 に細線化溝 8 の上部 8 A を形成後であって、レーザー光の集光照射を続行して、酸化物超電導線材 B の厚さ方向において更に深い位置である酸化物超電導層 6 と中間層 5 とを分断する際には、細線化溝 8 の上部 8 A において金属安定化層 7 の構成元素はほとんど無くなっている。このため、金属安定化層 7 に細線化溝 8 の上部 8 A を形成した後、レーザー光により酸化物超電導層 6 と中間層 5 とを分断する際には、分断の進行に伴い酸化物超電導層 6 の構成元素とキャップ層 5 C とを構成する元素が主体に分断または溶断されて、除去される。

このため、細線化溝 8 の両内壁部分には酸化物超電導層 6 の構成元素とキャップ層 5 C の構成元素との混合された被覆層 9 が生成される。そして、図 2 に示す断面構造のフィラメント導体 10 を備えた酸化物超電導導体 A を製造できる。

なお、レーザーによる切削回数は 2 回以上の任意の回数を採用できる。また、安定化層として Ag の安定化層の上に Cu の安定化層を設けている場合には、2 回の切削では中間層 5 まで溝を形成しきれないので、切削回数が多くなる。また、Ag の金属安定化層 7 の厚さ、酸化物超電導層 6 の厚さにも超電導導体の仕様などに応じて種々の厚さがあるので、切削回数は 2 回に限らず、これら各層の厚さに応じた任意の切削回数を選択することができる。従って、Ag の金属安定化層 7 が厚い場合には、1 回目の切削により Ag の安定化層 7 の途中まで切削する。また、2 回目の切削では、金属安定化層 7 を超えて酸化物超電導層 6 まで切削する。さらに、3 回目の切削では、キャップ層 5 C まで切削するなど、各層の厚さに応じて、適宜の深さまで酸化物超電導線材 B を切削する工程を繰り返す。そして、必要回数の酸化物超電導線材 B の切削を行うことにより、キャップ層 5 C の内部まで到達する深さを有する細線化溝 8 を形成することができる。

[0042] また、酸化物超電導層 6 の構成元素とキャップ層 5 C の構成元素とから形成される混合熔融物は電気絶縁性に優れた材料である。そのため、図 2 に示

すように絶縁抵抗の高い被覆層 9 で細線化溝 8 の両壁部分を覆った構造であり、細線化溝 8 の底面にキャップ層 5 C を構成する元素を存在させた構造とするならば、細線化溝 8 を介して細線化溝 8 の両側に隣接するフィラメント導体間における高い絶縁抵抗を確保することができる。例えば、常温で $10\text{ k}\Omega\text{ cm}$ 以上、好ましくは常温で $8\text{ M}\Omega\text{ cm}$ 以上、より好ましくは常温で $20\text{ M}\Omega$ 以上の高い絶縁抵抗を示すフィラメント導体 10 を備えた酸化物超電導導体 A を製造できる。

[0043] 以上説明のように製造されたマルチフィラメント構造の酸化物超電導導体 A は、細線化溝 8 を介して隣接するフィラメント導体間の絶縁抵抗が高いため、酸化物超電導層 6 を複数のフィラメント導体 10 に分割した効果により交流損失の少ない優れた酸化物超電導導体 A となる。

また、化学エッチングを用いることなく、紫外線領域のレーザー光による分断のみで細線化溝 8 を形成しているため、細線化溝 8 の形成精度が高く、幅 $5\text{ }\mu\text{m} \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ の範囲の細線化溝 8 を高い精度で形成できる。また、化学エッチングを利用していないため、細線化溝 8 の側縁部分にオーバーエッチングを生じることがなく、フィラメント導体 10 が基材 2 に対し密着しているため、剥離強度の高いフィラメント導体 10 を備えた酸化物超電導導体 A を提供できる。

更に、紫外線領域のレーザー光の照射のみで複数のフィラメント導体 10 を形成し、特許文献 1 に記載のような加熱処理 ($400 \sim 600^\circ\text{C}$) を施していないため、フィラメント導体 10 を構成する酸化物超電導層 6 の特性が劣化しない。このため、超電導特性に優れたフィラメント導体 10 を複数備えた交流損失の少ない酸化物超電導導体 A を提供できる。

実施例

[0044] 以下、実施例を示して本発明をさらに詳細に説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

「実施例 1」

ハステロイ C-276 (米国ヘインズ社商品名) からなる幅 5 mm 、厚さ

0.1 mm、長さ5 mのテープ状の基材上に、 $Gd_2Zr_2O_7$ の拡散防止層（厚さ50 nm）と、イオンビームアシスト蒸着法によるMgOの配向層（厚さ5 nm）と、スパッタ法による $LaMnO_3$ 層（厚さ5～8 nm）およびPLD法による CeO_2 層から形成されるキャップ層（厚さ500 nm）と、 $GdBa_2Cu_3O_x$ 層からなる酸化物超電導層（厚さ1.4 μm ）と、Agの金属安定化層（厚さ6～8 μm ）と、を成膜したテープ状の酸化物超電導線材を用意した。

[0045] 次に、図4に示す構成のレーザー加工装置を用い、加工用のレーザー光源として、エキシマパルスレーザー（KrF：248 nm、周波数200 Hz）を用いた。さらに、光学マスクを用いて、前記エキシマパルスレーザーのレーザー光の照射領域を長方形に変形させて用いた。加工すべき酸化物超電導線材の金属安定化層表面において25 $\mu m \times 500 \mu m$ の大きさを有するビーム形状となるように調整を行った。また、酸化物超電導線材にレーザー光を照射する際の移動速度を25 m/hに設定した。

上述の酸化物超電導導体に対し、上述の長方形のビーム照射領域となるようにレーザーを照射しつつ、レーザー照射位置を少しずつ移動させながら酸化物超電導線材の長さ方向にレーザー光による切削加工を行った。1回目のレーザー照射で金属安定化層を分断する細線化溝上部を形成した。2回目のレーザー照射でキャップ層まで達する深さの溝を形成するように、細線化溝下部を形成して酸化物超電導層の分割を行い、フィラメント導体を形成した。

図7に細線化溝を形成した後の酸化物超電導導体の電子顕微鏡写真を示す。図7の細線化溝の溝幅は25 μm である。なお、図7において、細線化溝の両側の部分には切削された堆積物が残留している部分が見られるので、この堆積物の残留部分を除いた部分の細線化溝の幅を25 μm としている。

図7の写真からも目的としたように幅25 μm の細線化溝を形成できていることがわかる。ビーム照射領域を長方形としたレーザービームによる切削であることが反映され、溝内には溝の幅方向に多数の筋状の加工痕を観察

できた。この加工の結果、細線化溝によって隔てられたフィラメント導体間の抵抗は約 $8\text{ M}\Omega$ （常温）となった。このため、フィラメント導体間の良好な絶縁状態を作り出すことができた。

[0046] 「実施例 2」

紫外線領域のレーザーを用いた 1 つの例としては、波長 248 nm のエキシマパルスレーザー KrF を用いて、酸化物超電導線材の切削加工を行った。また、他の例の 1 つには、波長 266 nm の YAG パルスレーザーを用いて酸化物超電導線材の切削加工を行った。いずれのレーザーにおいても、光学マスクによって長方形の強度分布のレーザー照射領域を作り出し、前記レーザー照射領域を用いて Ag の金属安定化層を有する酸化物超電導線材の切削加工を行った。

ここで、エキシマレーザーの長方形の短辺の長さを $50\text{ }\mu\text{m}$ とした。また、4 倍高調波（ 266 nm ）の YAG パルスレーザーの短辺の長さを $20\text{ }\mu\text{m}$ とした。加工に伴うレーザー光のパワー強度分布は、エキシマレーザーを用いた場合には、図 6（a）に示す矩形状である。また、加工に伴うレーザー光のパワー強度分布として、YAG レーザーを用いた場合には、図 6（b）に示すようにパワー強度分布の中央部にガウシアン成分が現れる。さらに、パワー強度分布の端の部分にコヒーレント成分に伴う光が発生するので、切削深さの調節は困難を伴う。即ち、YAG レーザーを用いて切削した場合、レーザー照射領域内で酸化物超電導線材を部分的に深く切削しすぎてしまうので、キャップ層の部分に位置するように細線化溝の底部を形成することができず、基材に到達する深さまで細線化溝を形成してしまった。

この結果、基材の成分を含む溶融凝固物が細線化溝の底部に残留したため、フィラメント導体間の抵抗が $2\text{ }\Omega\text{ cm}$ （常温）となり、細線化溝を介して隣接するフィラメント導体間が電氣的に繋がった構造となってしまった。この酸化物超電導体の I-V 特性（電流電圧特性）を測定した結果、転流を観察できた。そのため、4 倍高調波の YAG レーザーを用いて酸化物超電導層に細線化溝を形成すると、一部のフィラメント導体どうしが繋がっている

可能性が生じ、交流損失の低減を実現できていない状態となった。このため、YAGレーザーを用いて酸化物超電導層に細線化溝を形成する場合、レーザー光のパワー強度分布をトップハット型にすることが必要であることがわかる。

これに対しエキシマレーザーを用いて細線化溝を形成し、酸化物超電導層を分断してフィラメント導体を形成した酸化物超電導導体は、細線化溝を介するフィラメント導体間の抵抗として約20MΩcm（常温）を得ることができ、非常に良好な絶縁状態を作り出すことができた。

[0047] 同じ紫外線領域の高出力パルスレーザーでありながら違いが出た原因として、以下の理由が考えられる。エキシマレーザーはガスレーザーであるため干渉が少なく、無偏光状態のレーザーである。一方、4倍高調波のYAGレーザーは固体レーザーであるため、位相が非常に良く揃った偏光状態となっている。そのため、4倍高調波のYAGレーザーのレーザービーム中心のガウシアン成分の強度が強いことが原因であると思われる。また、エキシマレーザーは物質の分子結合を解いて物質を分解させる作用を奏する。エキシマレーザーは、熱で溶かして溶断するタイプの基本波のYAGレーザーよりも分解熱が少ない。そのため、エキシマレーザーを用いた場合には、溝底部がキャップ層に位置するような構造の細線化溝を形成できると思われる。なお、4倍高調波のYAGレーザーであっても、図6（a）に示すトップハット型のビーム強度に調整すれば、細線化溝の形成に適用することは可能と考えられる。

[0048] 図8に上述の酸化物超電導線材に対し、エキシマレーザーを用いてキャップ層まで達する深さの細線化溝を形成した酸化物超電導導体の断面構造写真を示す。

図8には、細線化溝の横断面において傾斜した内壁部の一側面の断面構造を拡大して示す。

図8において、符号30はAgの金属安定化層の部分を示し、符号31は被覆層の部分を示し、符号32はAgの金属安定化層の一部が符号33で示す

$GdBa_2Cu_3O_x$ から形成される組成の酸化物超電導層の端面を部分的に覆った部分を示す。符号34はキャップ層を示し、符号35はキャップ層34の下にI B A D-M g O層と $Gd_2Zr_2O_7$ 層を示し、符号36は基材を示す。

図8に示す断面構造写真から、細線化溝に臨むA gの金属安定化層30の一部が細線化溝に臨む酸化物超電導層の端面を一部覆うとともに、その金属安定化層30による被覆部分も含めて被覆層31が覆っている様子がわかる。また、被覆層31の底部は細線化溝の底部に露出しているキャップ層に被覆されている様子が判る。なお、被覆層31が酸化物超電導層33を構成する元素とキャップ層34を構成する元素とを主体として形成されていることは後に説明する実施例の試験結果から明らかにする。

[0049] 「比較例」

マルチフィラメント構造の希土類系酸化物超電導導体を作製するために、上述の酸化物超電導線材に対し、出力を制御したレーザー照射と2段階の化学エッチングとを組み合わせたレーザースクライビング法を用いて細線化溝を作製した。前記化学エッチングを組み合わせたレーザースクライビング法を以下に説明する。酸化物超電導線材の表面を洗浄後、マスクを施してからレーザーを照射し、マスクを部分的に除去して洗浄後、濃度35wt%の過酸化水素水と濃度30wt%のアンモニア水の1:1（体積比）混合液を用いてA gの金属安定化層のエッチングを行う。次いで硝酸セリウムアンモニウム溶液を用いてR E 1 2 3系の酸化物超電導層をエッチングして細線化溝を形成した後、マスク材を除去する方法である。

図9に化学エッチングを伴うレーザースクライビング法により得られた細線化溝の電子顕微鏡写真を示す。図9において、「Slot」と記載した部分が細線化溝を示し、「Filament」と記載した部分がフィラメント導体を示し、「Over-etching」と記載して矢印で示した部分がオーバーエッチング部分を示す。

図9に示すようにエッチングにより細線化溝を形成した場合、細線化溝の

溝幅を拡げるようにオーバーエッチング部分が生じており、この例では細線化溝の形成精度が悪いことが判る。また、このようにオーバーエッチング部分が生じた酸化物超電導導体に曲げ応力などが作用すると、オーバーエッチング部分を基点としてフィラメント導体が剥離し易くなるので、剥離応力の低い酸化物超電導導体となる問題がある。また、これらのオーバーエッチング部分に冷却用の液体窒素が浸入して膨張すると剥離強度が低下するおそれがあり、前記オーバーエッチング部分に水分が浸入して水分が膨張すると剥離強度の低下を引き起こすおそれがある。

これに対し上記実施例 1 および 2 の構造では化学エッチングを伴わないため、剥離強度の高い酸化物超電導導体を提供できる。

[0050] 「実施例 3」

エキシマレーザーを用いて加工した酸化物超電導導体の臨界電流 (I_c) 低下率について試験した。

酸化物超電導層の上に Ag の金属安定化層を成膜した 5 mm 幅の酸化物超電導線材に、エキシマレーザーを用いて細線化溝を形成する方法を適用し、10 分割構造の酸化物超電導導体（マルチフィラメント線材）を形成した。なお、本実施例において、酸化物超電導導体の幅方向両端のフィラメント導体は 10 分割には含めないで、実際には 12 分割した構造（12 個のフィラメント導体を有する構造）を採用した。波長 248 nm のエキシマパルスレーザー KrF を用い、レーザー光の強度分布を酸化物超電導導体の表面において $50\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ の大きさを有する矩形状の照射領域を生成するビームとなるように調整を行った。従って、溝幅 $50\ \mu\text{m}$ の細線化溝を酸化物超電導導体に形成した。

[0051] 分割した複数のフィラメント導体において $I-V$ 特性を測定し、この $I-V$ 特性から臨界電流 (I_c) を求めた。本実施例の試料では、 $50\ \mu\text{m}$ の溝幅の細線化溝であるため、面積低下率（細線化溝を形成し、酸化物超電導線材の面積が減少する割合であり、前記面積の減少割合に比例して臨界電流 (I_c) が低下する）は 18% であり、10 本のフィラメント導体の臨界電流

の合計値の低下率は22%であった。このため、加工による I_c の劣化率を4%に抑制することができた。本実施例の10本の超電導フィラメントの臨界電流値は、個々に以下の通りであった。

f_1 : 12.94 A、 f_2 : 12.83 A、 f_3 : 12.65 A、 f_4 : 12.62 A、 f_5 : 12.61 A、 f_6 : 13 A、 f_7 : 12.83 A、 f_8 : 12.16 A、 f_9 : 11.03 A、 f_{10} : 10.17 A。

これに対し、図9に示す比較例の酸化物超電導導体（化学エッチングを伴うレーザースクラビング法によって得られた酸化物超電導導体）の加工劣化率（加工による I_c 低下率）は20～30%であった。このため、エキシマレーザーを用いて加工する方法により得られた酸化物超電導導体は、エッチングにより得られた酸化物超電導導体よりも、加工劣化を抑制できることが判った。

[0052] また、実施例3で得られた酸化物超電導導体の各フィラメント間の抵抗を測定したところ、以下の通りとなった。

f_1 : f_2 間抵抗 27.0 M Ω cm、 f_2 : f_3 間抵抗 33.8 M Ω cm、 f_3 : f_4 間抵抗 364.5 M Ω cm、 f_4 : f_5 間抵抗 5.78 M Ω cm、 f_5 : f_6 間抵抗 30.9 M Ω cm、 f_6 : f_7 間抵抗 39.0 M Ω cm、 f_7 : f_8 間抵抗 40.5 M Ω cm、 f_8 : f_9 間抵抗 1 M Ω cm、 f_9 : f_{10} 間抵抗 5.08 M Ω cmであり、平均フィラメント間抵抗 60.7 M Ω cm（抵抗はいずれも常温における測定結果である）であった。

以上の測定結果から、エキシマレーザーを用いて酸化物超電導導体に細線化溝を形成し複数の細線化溝により分割されたフィラメント導体を形成することにより、隣接するフィラメント導体間の抵抗値が1 M Ω cm以上と絶縁抵抗の高い酸化物超電導導体を製造できることが明らかになった。本実施例では、具体的に、隣接するフィラメント導体間の抵抗値として、1 M Ω cm以上、364.5 M Ω cm以下を得ることができた。

[0053] 「実施例4」

エキシマレーザーを用いて加工した酸化物超電導導体のヒステリシス損失

を測定した。

マルチフィラメント構造の酸化物超電導導体について交流損失の変化を測定するために、上述の幅 5 mm、全長 5 m の酸化物超電導導体に対し長さ方向中央部 4.8 m のみを 10 分割構造とした酸化物超電導導体を作製し、ヒステリシス損失の変化を測定した。

図 10 にピックアップコイル法により測定した長さ 5 m の酸化物超電導導体のヒステリシス損失の測定結果を長さ方向に沿って示す。

図 10 に示すように、10 分割構造とした長さ 4.8 m の部分のヒステリシス損失が、分割構造としていない部分のヒステリシス損失に対し約 $1/10$ となった。

酸化物超電導導体の交流損失のほとんどはヒステリシス損失であるので、図 11 に示す結果は交流損失の変化と考えることができる。酸化物超電導導体の両端の未加工部分に比べて 10 分割構造のマルチフィラメント構造となるように形成した部分の交流損失を約 $1/10$ 程度に低減できることが判る。

[0054] 「実施例 5」

エキシマレーザーを用いて安定化銅付きの酸化物超電導線材をマルチフィラメント構造となるように形成した場合について試験した。

従来の化学エッチング法を用いる方法では、安定化銅付きの酸化物超電導線材をエッチングするための適切なエッチング液を現状技術では見つけれられていないので、Ag の金属安定化層の上に Cu の金属安定化層を積層した酸化物超電導導体を、マルチフィラメント構造を有するように形成することは従来不可能であった。

しかしながら、エキシマレーザーを用い化学エッチングを行わない方法は、物理的な加工であるため、安定化銅付きの酸化物超電導線材を、マルチフィラメント構造を有するように形成することを実現できる。

厚さ $10\ \mu\text{m}$ の Ag の第 1 の金属安定化層上に厚さ $20\ \mu\text{m}$ の Cu の第 2 の金属安定化層を積層した酸化物超電導線材に対し、エキシマレーザーを用

いて上述した実施例と同等条件にて細線化溝を形成した。

その結果、酸化物超電導導体において細線化溝の溝底面を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の精度で平坦に形成することができた。これにより、安定化銅付きの酸化物超電導線材に対し、キャップ層の位置に細線化溝を形成できることを実証できたので、上述の実施例と同様にマルチフィラメント構造であり、交流損失の低い酸化物超電導導体を製造できることが明らかとなった。

[0055] 「実施例 6」

実施例 1 で作製した酸化物超電導導体から F I B（収束イオンビーム装置）を用いて細線化溝周辺のフィラメントの断面観察試料を切り出し、E P M Aを用いて図 1 1 の写真に示すように分析した。図 1 1 の写真に示す加工溝と記載した部分が細線化溝に対応し、A g と記載した部分が金属安定化層の部分を示す。Hastelloy（米国ヘインズ社商品名）と記載した部分が基材を示し、G d B C O と記載して矢印で示す部分が酸化物超電導層に対応する。

図 1 1 の写真の右側に、細線化溝（加工溝）の一部分の元素分析結果（A g、G d、B a、C u、C e、O、N i、およびC rの各元素についての元素分析結果）を示す。

図 1 1 に示す元素分析結果から、細線化溝の両内壁部分には、G d、B a、C u、C e、およびOが存在することがわかる。C e の分析結果をみると、細線化溝内全面にC e が見える。E P M A は、数 μm の深さまで侵入した電子が発生させる 2 次電子からの情報であるので、表面にC e があっても細線化溝の内部のN i およびC o も検出されている。また、細線化溝の内底面を見ると、C u は検出されていないが、C e が検出されていることは、細線化溝の内底面（最表面）がC e O₂であることを示している。また、G d、B a、C u、およびC e の各分析結果とも、細線化溝の左右の内壁部分のうち、右側の内壁部分が左側の内壁部分より薄く表示されている。これは、通常は平面部分のみの分析に使う分析方法を溝に対して適用したため、検出器の位置により片方の内壁部分が観測されにくくなった（検出されにくくなった）影響である。

以上の結果から、細線化溝の両内壁部分には、酸化物超電導層の構成元素であるGd、Ba、Cu、およびOが存在しており、中間層の構成元素であるCeおよびOも存在していることが判明した。

このことから、細線化溝の両内壁部分の被覆層は酸化物超電導層およびキャップ層の構成成分から形成されていることが判り、細線化溝の内底面はCeO₂であることがわかった。

[0056] 「実施例7」

実施例1と比較例とにおいて作製した幅5mm、10分割構造の酸化物超電導導体の一部を切り出し、各々の酸化物超電導導体の剥離強度について測定した。また、比較のために、キャップ層を形成する際に行うPLD法に代えて、MOD (Metal-organic deposition) 法により作製した酸化物超電導導体にレーザー照射およびエッチングを行って得た試料の剥離強度も測定した。

MOD法による酸化物超電導導体は、基材からキャップ層までは先の実施例1の酸化物超電導導体と同様に形成され、酸化物超電導層の厚さ1.4～1.6μmとなるように形成した。さらに、MOD法による酸化物超電導導体には、Agの金属安定化層として、厚さ5μmのAgの金属安定化層を形成した試料と、厚さ10μmのAgの金属安定化層を形成した試料を複数試験した。MOD法による酸化物超電導層は、トリフルオロ酢酸イットリウムとトリフルオロ酢酸バリウムとトリフルオロ酢酸銅 (Cuの一部をオクチル酸に置換) とから形成されるゲル状膜をキャップ層上に塗布した後、仮焼成、本焼成、および酸素アニール処理を経て製造されたYBa₂Cu₃O_{7-x}の組成を有する酸化物超電導層である。

[0057] 図12に示すように、エキシマレーザーを用いて細線化溝を形成するエッチングレススクライピングにより形成された酸化物超電導導体において剥離強度が向上した。エキシマレーザーにより細線化溝を形成するスクライピングは、細線化溝の面積分を差し引いた面積換算強度で剥離強度が62～93MPaであった。一方、加工前の酸化物超電導線材の剥離強度が60～90

MPaであるので、エキシマレーザーにより細線化溝を形成するスクライビングにおいて細線化溝形成後の剥離強度がほとんど低下していないことが判明した。

なお、これらの結果から、エキシマレーザーにより細線化溝を形成するスクライビングにより細線化溝を形成した酸化物超電導線材において、細線化溝の形成による面積低下を考慮した上で、細線化溝形成前の剥離強度の6割〜同等までとなるように剥離強度を維持することができることが判明した。

産業上の利用可能性

[0058] 本発明は、交流損失の少ないマルチフィラメント型の酸化物超電導導体を得ることができる技術に関する。

符号の説明

[0059] A…酸化物超電導導体、B…酸化物超電導線材、C…レーザー加工装置、2…基材、5…中間層、5A…拡散防止層、5B…配向層、5C…キャップ層、6…酸化物超電導層、6a…端面、7…金属安定化層、7a…端面、8…細線化溝、8a…底部（溝底部）、8b…開口部、8e…内端部、9…被覆層、9a…上部、9b…下部、15…レーザー発光装置、16…筒部材、17…ノズル体、18…アシストガス供給源、19…レンズ装置、20…光学装置。

請求の範囲

- [請求項1] 酸化物超電導導体であって、
金属製の基材と、
前記基材上に設けられた絶縁性の中間層と、
前記中間層上に設けられた酸化物超電導層と、
前記酸化物超電導層上に設けられた金属安定化層と、
前記基材の長手方向に沿って前記金属安定化層と前記酸化物超電導層とを分断し、前記金属安定化層から前記酸化物超電導層を介して前記中間層の内部に達し、前記基材に到達しない複数の細線化溝と、を備え、
前記金属安定化層および前記酸化物超電導層が、前記複数の細線化溝により複数のフィラメント導体を形成するように分割されており、
前記複数の細線化溝のうちそれぞれの細線化溝において、前記細線化溝の溝開口部の幅が、前記細線化溝の溝底部の幅と同等以上である酸化物超電導導体。
- [請求項2] 前記細線化溝は、前記細線化溝の溝壁部分が前記中間層および前記酸化物超電導層の構成元素から形成された絶縁性の被覆層により覆われ、前記被覆層と前記溝底部とが絶縁性となるように、レーザー照射によって形成されている請求項1に記載の酸化物超電導導体。
- [請求項3] 前記溝底部の溝幅が $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下である請求項1または2に記載の酸化物超電導導体。
- [請求項4] 前記複数のフィラメント導体において、前記細線化溝を介し隣り合うフィラメント導体間の抵抗が $1\text{ M}\Omega\text{ cm}$ 以上である請求項1～3のいずれか一項に記載の酸化物超電導導体。
- [請求項5] 前記中間層が、高結晶配向性を有する配向層と、前記配向層の上に形成されたキャップ層と、を備え、前記溝底部が前記キャップ層内に位置するように形成され、前記溝底部において、前記キャップ層の一部が露出するように前記細線化溝が形成された請求項1～4のいずれ

か一項に記載の酸化物超電導導体。

[請求項6]

酸化物超電導導体の製造方法であって、

金属製の基材と、前記基材上に設けられた絶縁性の中間層と、前記中間層上に設けられた酸化物超電導層と、前記酸化物超電導層上に設けられた金属安定化層と、を備えた酸化物超電導線材を準備し、

前記金属安定化層の上方から紫外線領域のレーザーを前記酸化物超電導線材に集光照射することにより、前記金属安定化層と前記酸化物超電導層とを分断し、

前記中間層の内部まで到達し、前記基材には到達しないように、それぞれの細線化溝の溝開口部の幅が前記細線化溝の溝底部の幅より大きくなるように、前記基材の長手方向に沿った複数の細線化溝を前記酸化物超電導線材に形成することによって前記酸化物超電導層を複数のフィラメント導体を形成するように分割する

酸化物超電導導体の製造方法。

[請求項7]

前記細線化溝の溝壁部を前記中間層および前記酸化物超電導層の構成元素から形成される絶縁性の被覆層により覆う請求項6に記載の酸化物超電導導体の製造方法。

[請求項8]

前記紫外線領域のレーザーとして、集光部分先端のレーザー強度分布が平坦なトップハット型の強度分布を有するレーザー波長380nm以下のレーザーを用いる請求項6または7に記載の酸化物超電導導体の製造方法。

[請求項9]

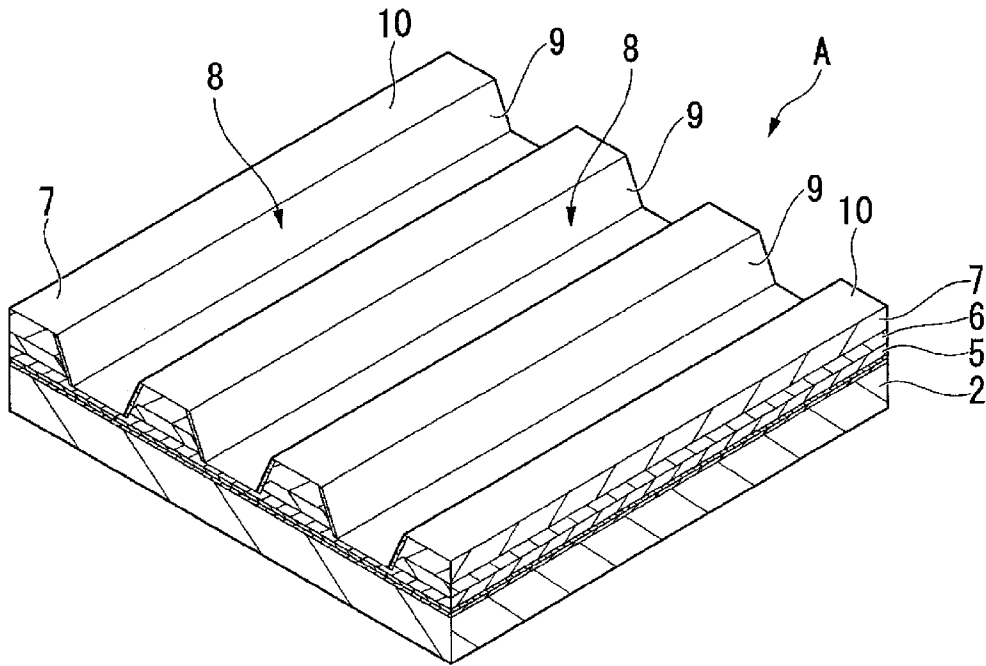
前記レーザーを前記金属安定化層の外側から集光照射するとともに、アシストガスを前記金属安定化層に供給して、前記金属安定化層のレーザー集光照射部分を溶融除去し、

前記酸化物超電導層および前記中間層に前記レーザーを集光照射して、前記酸化物超電導層のレーザー集光照射部分と前記中間層のレーザー集光照射部分とを溶融除去して前記細線化溝を形成し、

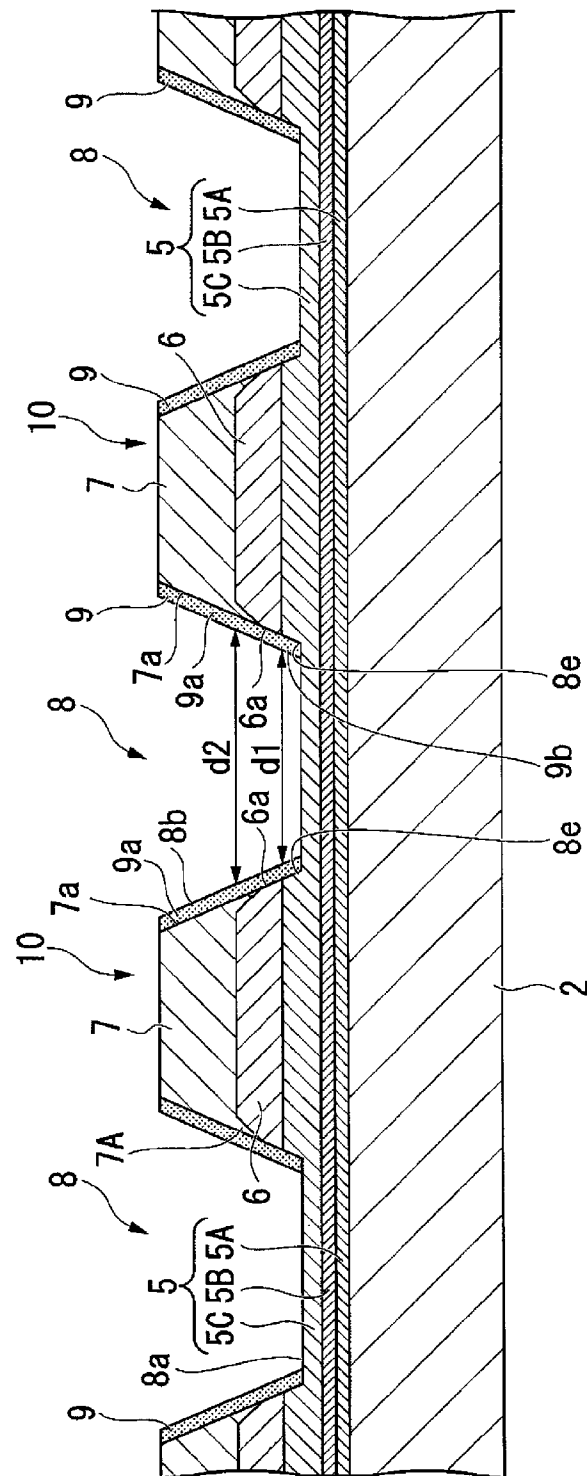
前記溝壁部分を前記被覆層で覆う

請求項 7 または 8 に記載の酸化物超電導導体の製造方法。

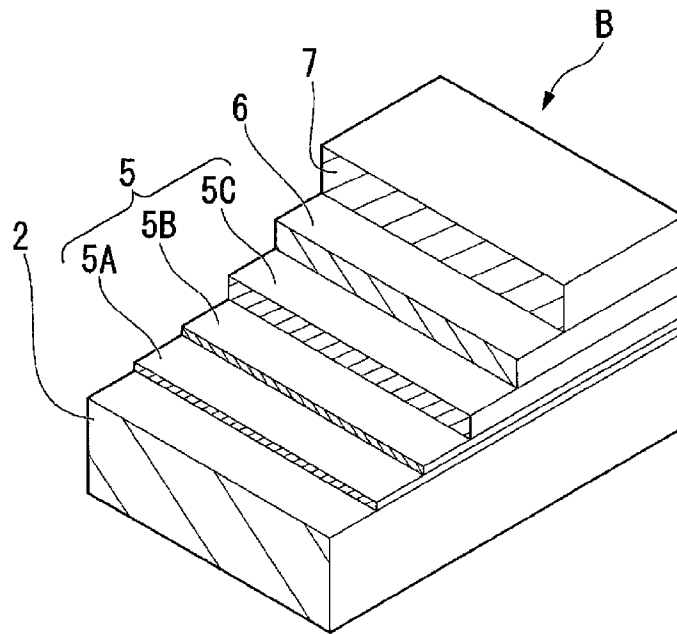
[図1]



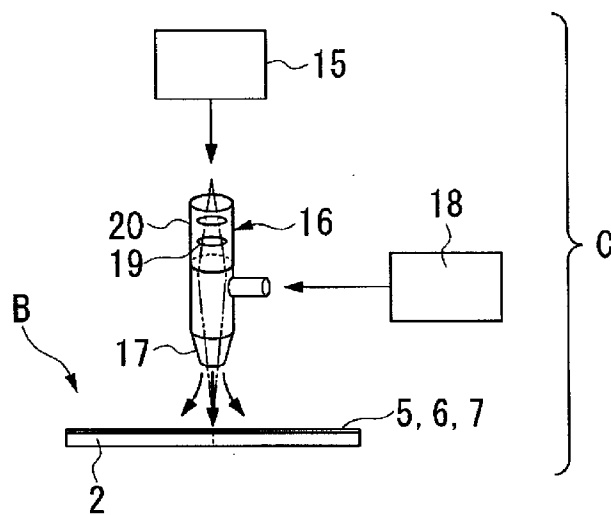
[図2]



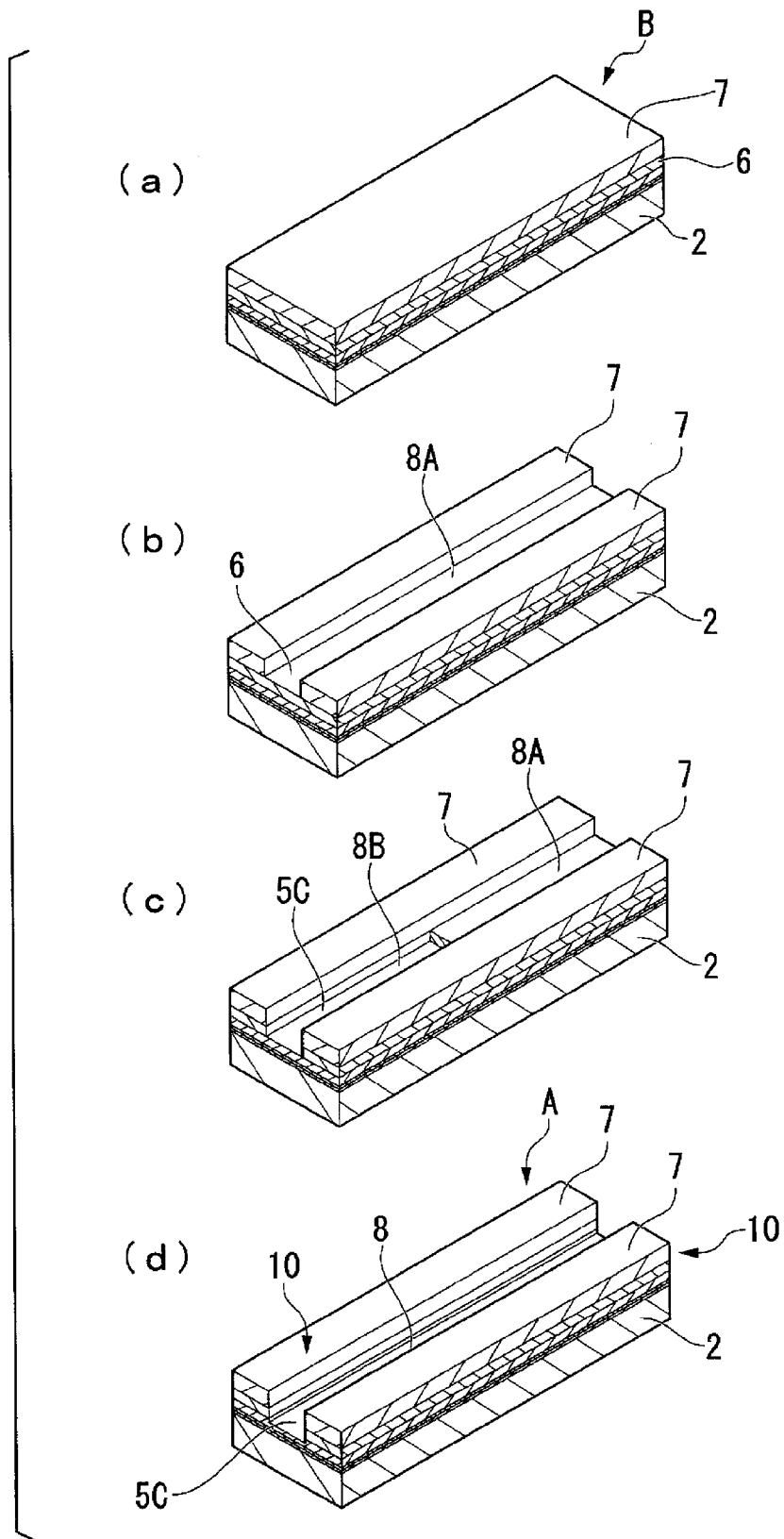
[図3]



[図4]

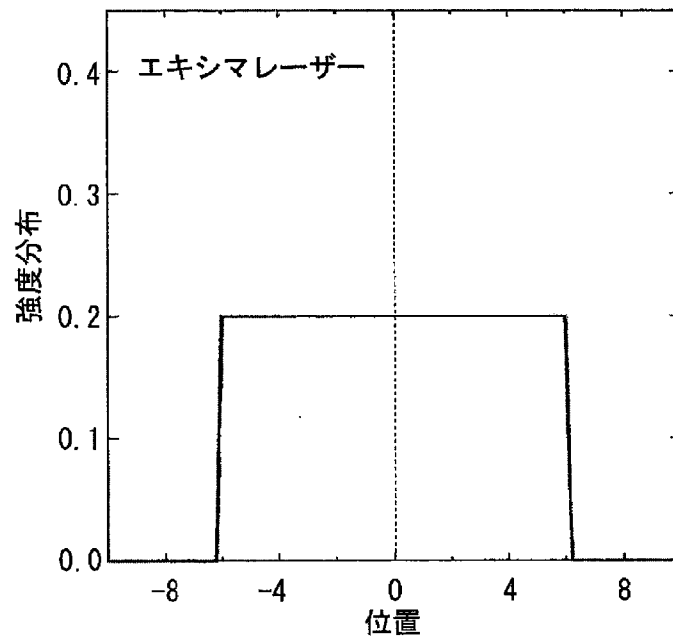


[図5]

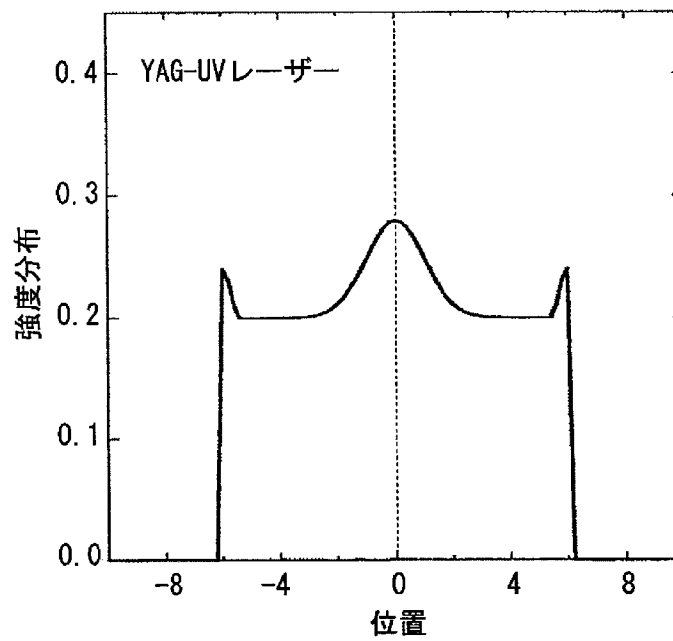


[図6]

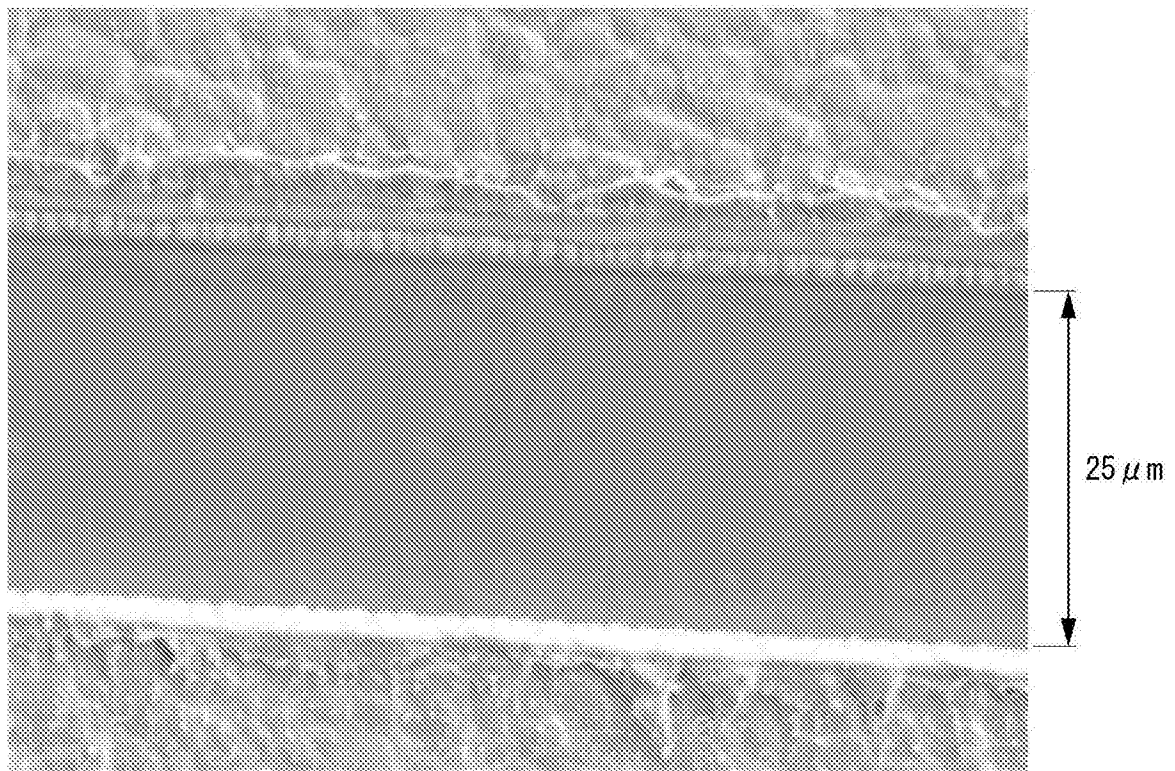
(a)



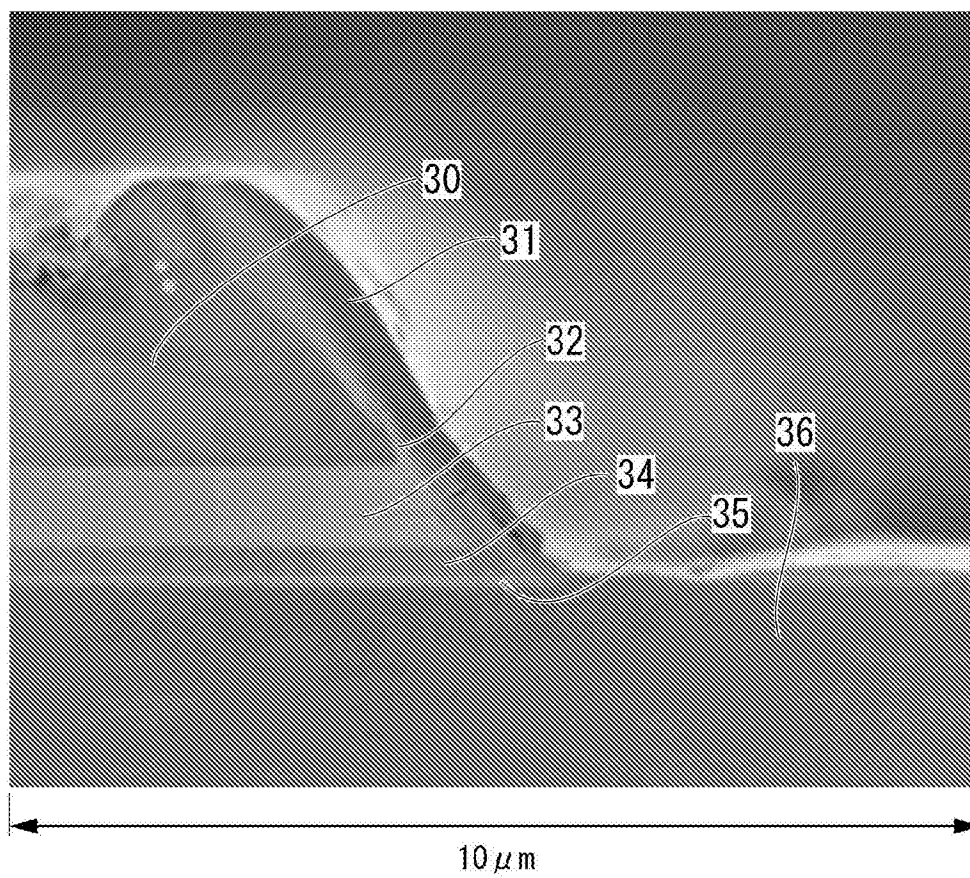
(b)



[図7]

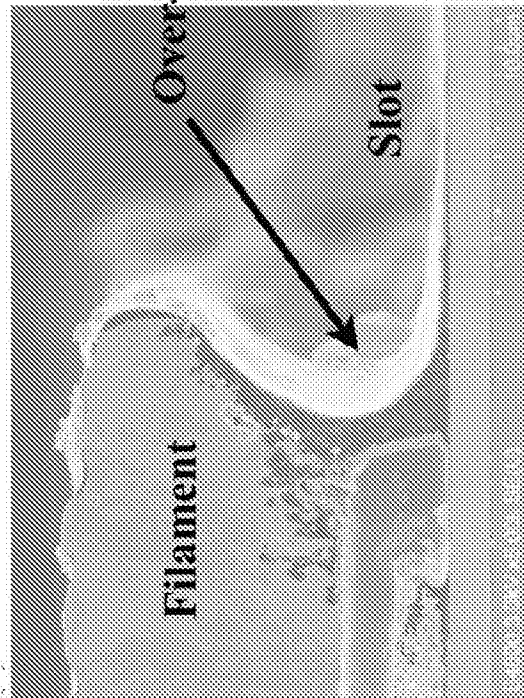


[図8]

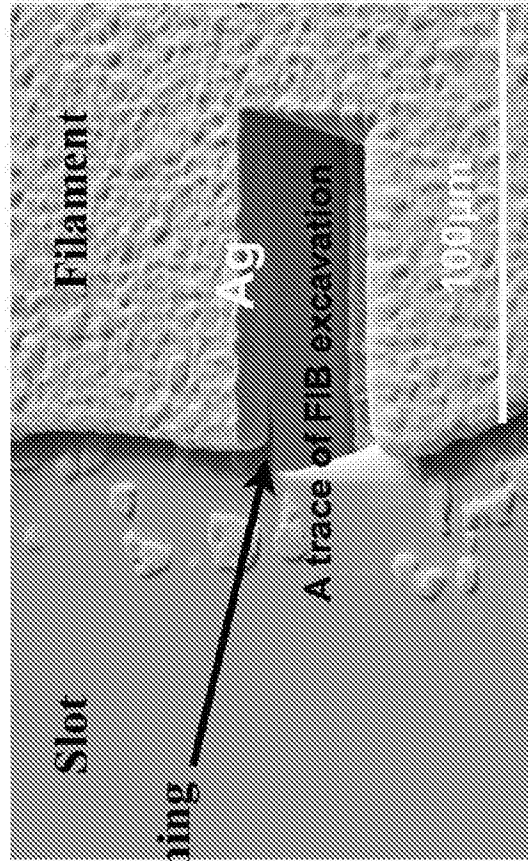


[図9]

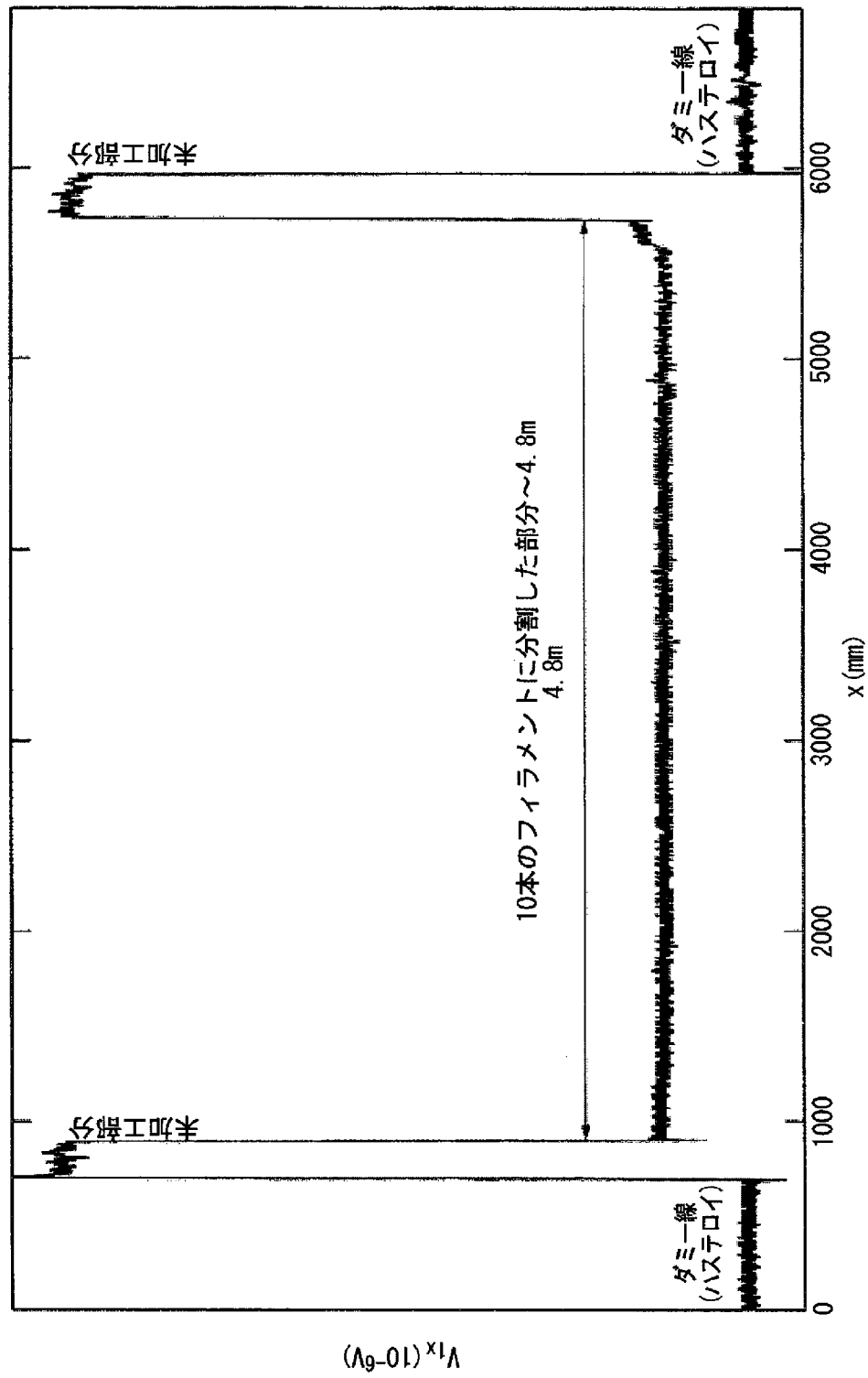
(a)



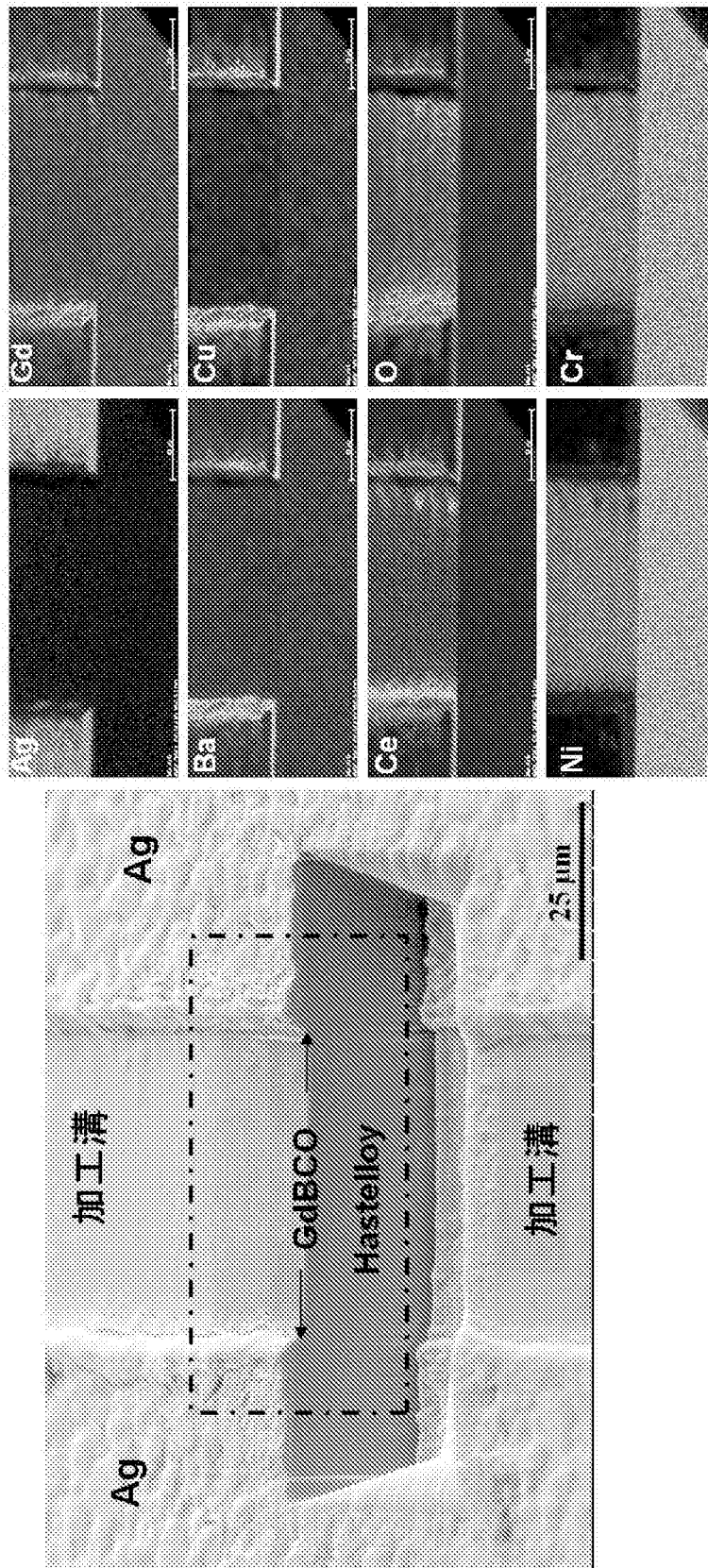
(b)



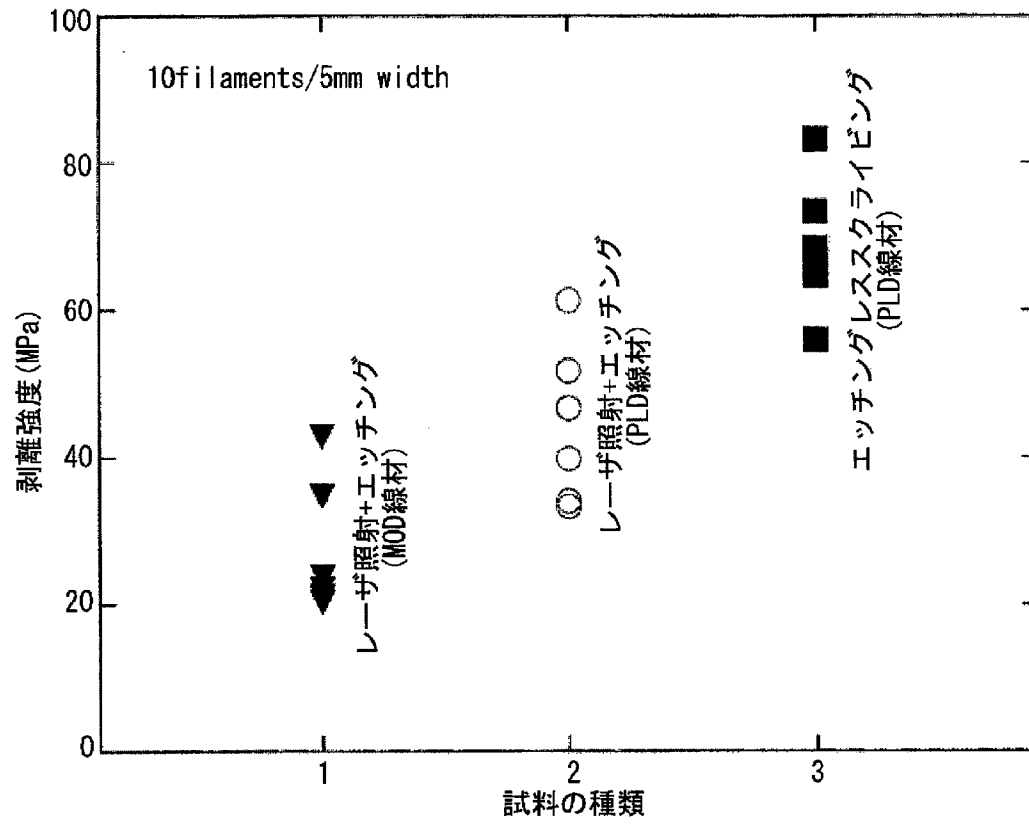
[図10]



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/064121

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01B12/06(2006.01)i, H01B13/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01B12/06, H01B13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2010-282893 A (Fujikura Ltd.), 16 December 2010 (16.12.2010), paragraphs [0011] to [0030], [0040] to [0048], [0054] to [0056]; fig. 1, 3 (Family: none)	1-9
Y	JP 2013-4457 A (Fujikura Ltd.), 07 January 2013 (07.01.2013), paragraphs [0031], [0032]; fig. 4 (Family: none)	1-9
Y	JP 2007-141688 A (Railway Technical Research Institute), 07 June 2007 (07.06.2007), paragraph [0023]; fig. 1 to 3 & US 2007/0145100 A1 & EP 1788641 A2 & KR 10-2007-0053120 A	2, 7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
12 August, 2014 (12.08.14)

Date of mailing of the international search report
26 August, 2014 (26.08.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/064121

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2011-181559 A (Fujitsu Ltd.), 15 September 2011 (15.09.2011), paragraph [0030] (Family: none)	6-9
A	US 2009/0170708 A1 (INTERNATIONAL SUPERCONDUCTIVITY TECHNOLOGY CENTER, THE JURIDICIAL FOUNDATION), 02 July 2009 (02.07.2009), paragraphs [0069] to [0072]; fig. 1 & JP 4657921 B2 & EP 1653485 A1 & WO 2005/008687 A1	1-9

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. H01B12/06(2006.01)i, H01B13/00(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. H01B12/06, H01B13/00			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 1 4 年 日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 1 4 年 日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 1 4 年			
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
Y	JP 2010-282893 A（株式会社フジクラ）2010.12.16, 段落[0011]-[0030], [0040]-[0048], [0054]-[0056], 図1, 3 （ファミリーなし）	1 - 9	
Y	JP 2013-4457 A（株式会社フジクラ）2013.01.07, 段落[0031], [0032], 図4（ファミリーなし）	1 - 9	
☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献			
国際調査を完了した日 1 2 . 0 8 . 2 0 1 4		国際調査報告の発送日 2 6 . 0 8 . 2 0 1 4	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官（権限のある職員） 神田 太郎	5 N 3 7 8 0
		電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1	内線 3 5 8 6

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2007-141688 A (財団法人鉄道総合技術研究所) 2007. 06. 07, 段落[0023], 図 1-3 & US 2007/0145100 A1 & EP 1788641 A2 & KR 10-2007-0053120 A	2, 7
Y	JP 2011-181559 A (富士通株式会社) 2011. 09. 15, 段落[0030] (ファミリーなし)	6 - 9
A	US 2009/0170708 A1 (INTERNATIONAL SUPERCONDUCTIVITY TECHNOLOGY CENTER, THE JURIDICIAL FOUNDATION) 2009. 07. 02, 段落[0069]-[0072], 図 1 & JP 4657921 B2 & EP 1653485 A1 & WO 2005/008687 A1	1 - 9