

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6104455号
(P6104455)

(45) 発行日 平成29年3月29日(2017.3.29)

(24) 登録日 平成29年3月10日(2017.3.10)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 B 12/06 (2006.01)

H O 1 B 12/06 Z A A

H O 1 B 13/00 (2006.01)

H O 1 B 13/00 5 6 5 C

H O 1 L 39/24 (2006.01)

H O 1 L 39/24 B

C 2 3 C 16/40 (2006.01)

C 2 3 C 16/40

C O 1 G 1/00 (2006.01)

C O 1 G 1/00 S

請求項の数 17 (全 20 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2016-505620 (P2016-505620)
 (86) (22) 出願日 平成26年4月1日(2014.4.1)
 (65) 公表番号 特表2016-522534 (P2016-522534A)
 (43) 公表日 平成28年7月28日(2016.7.28)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2014/032560
 (87) 国際公開番号 W02014/209458
 (87) 国際公開日 平成26年12月31日(2014.12.31)
 審査請求日 平成27年11月6日(2015.11.6)
 (31) 優先権主張番号 61/807,142
 (32) 優先日 平成25年4月1日(2013.4.1)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 510194415
 ザ ユニバーシティ オブ ヒューストン
 システム
 アメリカ合衆国 テキサス 77204-
 2015, ヒューストン, イー. カ
 レン 316
 (74) 代理人 100078282
 弁理士 山本 秀策
 (74) 代理人 100113413
 弁理士 森下 夏樹
 (72) 発明者 セルバマニカム, ペンカット
 アメリカ合衆国 テキサス 77059,
 ヒューストン, エメラルド フォール
 ズ ドライブ 3902

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 低温における向上された磁束ピンニングを有する半導体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

超電導体テープであって、前記超電導体テープは、
 前記テープに垂直な配向を有する 3 T の磁場下、3 0 K において、3 . 0 よりも大きい
 またはそれに等しいリフトファクタを備え、
 前記テープは、3 0 K における前記 3 T の磁場下、8 0 0 A / c m - 幅よりも大きい臨
 界電流をさらに備える、超電導体テープ。

【請求項 2】

全カチオンの 3 2 . 0 原子% よりも大きいバリウムおよびドーパント含有量をさらに備
 える、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

【請求項 3】

全カチオンの 4 9 . 0 原子% よりも小さい銅含有量をさらに備える、請求項 2 に記載の
 超電導体テープ。

【請求項 4】

前記ドーパント含有量は、全カチオンの少なくとも 1 . 6 5 原子% であり、前記バリウ
 ム含有量は、全カチオンの少なくとも 2 9 . 9 原子% である、請求項 2 に記載の超電導体
 テープ。

【請求項 5】

前記リフトファクタは、3 T の磁場下、3 0 K において、4 . 0 よりも大きいまたはそ
 れに等しい、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

【請求項 6】

全カチオンの 33.0 原子% よりも大きいバリウムおよびドーパント含有量をさらに備える、請求項 5 に記載の超電導体テープ。

【請求項 7】

全カチオンの 49.0 原子% よりも小さい銅含有量をさらに備える、請求項 6 に記載の超電導体テープ。

【請求項 8】

前記ドーパント含有量は、全カチオンの少なくとも 1.65 原子% であり、前記バリウム含有量は、全カチオンの少なくとも 30.5 原子% である、請求項 6 に記載の超電導体テープ。

10

【請求項 9】

37.5 % よりも大きいバリウム対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率、2.0 % よりも小さいドーパント対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率、60.5 % よりも小さい銅対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率をさらに備える、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

【請求項 10】

0.58 よりも大きいまたはそれに等しいバリウム対銅の比率をさらに備える、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

【請求項 11】

0.62 よりも大きいまたはそれに等しいバリウムおよびドーパント対銅の比率をさらに備える、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

20

【請求項 12】

38.0 % よりも大きいバリウム対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率、2.5 % よりも小さいドーパント対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率、59.5 % よりも小さい銅対バリウムおよびドーパントおよび銅の比率をさらに備える、請求項 5 に記載の超電導体テープ。

【請求項 13】

0.62 よりも大きいまたはそれに等しいバリウム対銅の比率をさらに備える、請求項 5 に記載の超電導体テープ。

【請求項 14】

0.65 よりも大きいまたはそれに等しいバリウムおよびドーパント対銅の比率をさらに備える、請求項 5 に記載の超電導体テープ。

30

【請求項 15】

外部磁場の不在下、77 K において、4.2 MA / cm² よりも小さいまたはそれに等しい臨界電流密度をさらに備える、請求項 1 に記載の超電導体テープ。

【請求項 16】

外部磁場の不在下、77 K において、3.8 MA / cm² よりも小さいまたはそれに等しい臨界電流密度をさらに備える、請求項 5 に記載の超電導体テープ。

【請求項 17】

REBCO 超伝導テープを製造する方法であって、

40

前記方法は、超伝導テープ基板に前駆体蒸気を印加することを含み、

前記前駆体蒸気は、

前記テープに垂直な配向を有する 3 T の磁場下、30 K において、3.0 よりも大きいまたはそれに等しいリフトファクタであって、前記テープは、30 K における前記 3 T の磁場下、800 A / cm - 幅より大きい臨界電流をさらに備える、リフトファクタと

、

全カチオンの 33.0 原子% よりも大きいバリウムおよびドーパント含有量と、

全カチオンの 49.0 原子% よりも小さい銅含有量と

を備えるフィルムをもたらす、方法。

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(関連出願の引用)

本願は、2013年4月1日に出願された、米国仮出願第61/807,142号に対する優先権を主張するものであり、該仮出願の全内容は、参照により本明細書中に援用される。

【0002】

(政府支援)

エネルギー省高等研究計画局助成(ARPA-E) DE - AR 0000196号

10

【背景技術】

【0003】

いくつかの材料システムが、エネルギー発生、伝送、変換、貯蔵、および使用と関連付けられた迫り来る問題を解決しようと開発されている。超電導体は、広スペクトルのエネルギー問題を横断する解決策を提供する、ユニークなシステムである。超電導体は、発生器、電力伝送ケーブル、モータ、変圧器、およびエネルギー貯蔵内に高効率を可能にする。さらに、超電導体は、エネルギーを超えて、医学、粒子物理学、通信、および輸送まで用途が及ぶ。

【0004】

超伝導テープは、ますます一般的となりつつある。これは、部分的には、エピタキシャル単結晶薄フィルムを多結晶基板上に生成する加工技法の成功に起因するものである(Y. Iijima, et al., Physica C 185, 1959(1991), X.D. Wu, et al., Appl. Phys. Lett. 67, 2397(1995), A. Goyal, et al., Appl. Phys. Lett. 69(1996)p.1795, V. Selvamanickam et al., "High Performance 2G wire: From R&D to Pilot-scale Manufacturing", IEEE Trans., Appl. Supercond. 19, 3225(2009))。本技法では、岩塩結晶構造(例えば、MgO)を有する材料の薄フィルムが、イオンビーム支援蒸着によって、可撓性多結晶基板を覆って蒸着される。本技法によって処理される超伝導フィルムは、単一結晶基板上に成長されるエピタキシャルフィルム内で達成されるものと匹敵する、臨界電流密度を呈する。本技法を使用して、いくつかの機関が、超伝導複合テープのパイロット規模製造を実証している。注目すべきことに、単結晶エピタキシャルフィルムは、多結晶基板ベースを使用して、1kmを超える長さで製造されている。

20

30

【0005】

超電導体の有意な短所の1つは、超電導体が磁場に暴露されるとき、電流を搬送するその能力が急低下することである。したがって、風発生器、モータ、高界磁石、またはエネルギー貯蔵システム等のある用途では、超電導体は、発生器コイルが、数テスラにおいて、磁場に暴露されるため、電位を搬送するその全電流を達成することができない。別の短所は、高温超電導体(HTS)では、超伝導が、Cu-O平面内に局在することである(E. M. Gyorgy, et al., "Anisotropic critical currents in $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_7$ analyzed using an extended bean model" Appl. Phys. Lett. 55, 283(1989))。本現象は、超電導体の電流搬送能力に効果をもたらす。例えば、図1は、金属有機化学蒸着(MOCVD)と呼ばれるプロセスによって作製される、標準的HTSテープの臨界電流における異方性を図示する。異方性効果は、HTSフィルム表面に対して異なる角度で磁場を整合させることによって可視化されることができる。臨界電流は、磁場が、フィルム表面から移動されるにつれて、急降下する。さらに、臨界電流は、磁場がテープ法線から0°角度(すなわち、テープ表面に垂直)に配向

40

50

されると、低値に到達する。本磁場配向における臨界電流は、これらの標準的テープを用いて構築されるコイルの性能における限界値である。

【0006】

過去10年にわたって、研究は、磁場に暴露される超電導体の電流搬送能力の改善に焦点が当てられている。有意な研究は、超電導体における磁束ピンニングを改善することに焦点を当てている。磁束ピンニングは、I型超電導体と異なり、磁場の部分的穿通を可能にする、2つの臨界磁場を有する、II型高温超電導体(HTS)の現象である。下部臨界磁場の上方では、2GHTSテープは、磁束が、磁束管を通した超伝導電流渦によって囲繞される量子化されたパケット内で超伝導フィルムを穿通することを可能にする。より低い電流では、磁束管は、定位置にピンニングされる。本ピンニング現象は、実質的に、超電導体内に望ましくない電気抵抗を生成し得る、任意の磁束クリーピングを低減させることができる。したがって、磁束ピンニングの改良は、超電導体が磁場内で被る前述の短所を最小限にすることができる(例えば、異方性、より低い臨界電流等)。

【0007】

磁束ピンニングを改善するための最も追究されている戦略は、穿通された磁束線の側方サイズがコヒーレンス長の値の2倍に等しいため、超伝導コヒーレンス長と側方寸法が匹敵する、欠陥を超電導体の中に導入することである。2GHTSテープでは、欠陥は、種々の組成物および構造の酸素空孔、貫通転位、双晶面、不純物原子、照射誘導柱状欠陥、およびナノ構造含有を含む(V. M. Pan, et al., "Dimensional crossovers and related flux line-lattice states in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", *Physica C* 279, 18 (1997); J. M. Huijbregtse, et al., "Vortex pinning by natural defects in thin films of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", *Supercond. Sci. Technol.* 15, 395 (2002)、G. Blatter, et al., "Vortices in high-temperature superconductors", *Rev. Mod. Phys.* 66 1125 (1994), L. Civale, "Vortex pinning and creep in high-temperature superconductors with columnar defects", *Supercond. Sci. Technol.* 10, A11 (1997)、C. J. van der Beek, et al., "Strong pinning in high-temperature superconducting film", *Phys. Rev. B* 66, 024523 (2003))。特に、照射誘導柱状欠陥は、磁束ピンニングを改善するために大きな潜在性を示している。研究グループは、近年、超伝導フィルムを BaZrO_3 (BZO)または BaSnO_3 (BSO)で化学的にドーピングすることによって、柱状欠陥を導入するアプローチを開発している(J. L. Macmanus-Driscoll et al., "Strongly enhanced current densities in superconducting coated conductors of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{BaZrO}_3$ ", *Nature Materials* 3, 439 (2004); S. Kang et al. "High-Performance High-Tc Superconducting Wires", *Science* 311, 1911 (2006)、Y. Yamada et al., "Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in $\text{Y}(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coated conductors", *Appl. Phys. Lett.* 87, 132502 (2005); C. Varanasi, et al., "Thick $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{BaSnO}_3$ films with enhanced critical current density at high magnetic fields", *Appl. Phys. Lett.* 9

10

20

30

40

50

3092501, (2008))。BZOおよびBSOの含有は、超電導体フィルム成長の間の自己アセンブリプロセスによって、ナノサイズ柱(約5nmの直径)を形成し、フィルムのピン止め強度を有意に改良した(S. Kang et al., "High-Performance High-Tc Superconducting Wires", Science 311, 1911 (2006)、Y. Yamada et al., "Epitaxial nanostructure and defects effective for pinning in Y(RE)Ba₂Cu₃O_{7-x} coated conductors", Appl. Phys. Lett. 87, 132502 (2005); C. Varanasi, et al., "Thick YBa₂Cu₃O_{7-x} + BaSnO₃ films with enhanced critical current density at high magnetic fields", Appl. Phys. Lett. 93092501, (2008); T. Horide, et al., "The crossover from the vortex glass to the Bose glass in nanostructured YBa₂Cu₃O_{7-x} films", Appl. Phys. Lett. 82, 182511 (2008), M. Mukaida, et al., "Critical Current Density Enhancement around a Matching Field in ErBa₂Cu₃O_{7-δ} Films with BaZrO₃ Nano-Rods", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L952 (2005))。

【0008】

図2は、ほとんどがフィルム平面に垂直に配向されるBZOナノ柱とともに、MOCVDによって成長された(Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x(Gd-YBCO)フィルムの断面微小構造を表示する。図1に示されるように、BZOでドーブされたフィルムは、特に、BZOナノ柱の方向に沿って(すなわち、テープに垂直に)配向される磁場に暴露されると、77K時、1テスラの磁場内で2倍の改良された性能を呈する。また、ナノ柱は、フィルム成長方向を中心として広がり呈するため、改良されたピン止めが、磁場配向の範囲にわたって観察される。最後に、BZODーブフィルムは、有意により低い異方性を呈する(V. Selvamanickam et al., "Influence of Zr and Ce Doping on Electromagnetic Properties of (Gd, Y)-Ba-Cu-O Superconducting Tapes Fabricated by Metal Organic Chemical Vapor Deposition", Physica C 469, 2037 (2009))。

【0009】

BZODーブREBCO(RE=希土類)テープに焦点を当てたほとんどの研究は、77K時、1-3テスラの磁場下、磁場内に臨界電流を報告している。少なくとも1つの研究グループは、4.2K時、最大30Tまで、高磁場内に臨界電流を報告している(V. Braccini, et al., "Properties of recent IBAD-MOCVD Coated Conductors relevant to their high field, low temperature magnet use", Superconductor Science and Technology 24, 035001(2011))。残念ながら、20~50Kの中間温度において、数ステラの実践的磁場内で臨界電流を報告している研究は、殆どまたは全くない。しかし、風発生器、公益事業発生器、海洋モータ、および産業モータ等のいくつかの2G HTS用途は、これらの後者の磁場および中間温度範囲において開発されている(A. B. Abrahamsen, et al., "Feasibility study of 5 MW superconducting wind turbine generator", Physica C. 471, 1464-69 (2011)

1); P. Kummeth, et al., "Development of synchronous machines with HTS rotor", Physica C 426, 1358-64 (2005)).

【0010】

最近、77 K時、1 T磁場下、REBCO性能に2倍の改良を達成するために必要なZrのレベルは、20 K～50 K時、数テスラのより実践的磁場（以下「実践的条件」）では、同一改良を達成しなかったことが実証されている（V. Selvamanickam, et al., "Enhanced critical currents in high levels of Zr-added (Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol. 26, 035006 (2013))。しかし、より高いレベルのZrは、実際、実践的条件下において、REBCO性能の改良につながることもまた、同一刊行物に示されている（V. Selvamanickam, et al., "Enhanced critical currents in high levels of Zr-added (Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol. 26, 035006 (2013))。特に、フィルムの「リフトファクタ」（典型的には、30 K、3 Tで約2.1）は、実質的に、より高いレベルのZr添加によって改良される。「リフトファクタ」は、実践的条件下におけるテープの臨界電流対77 K時ゼロ磁場下のテープの臨界電流の比率を指す。また、最近、高臨界電流密度（概して求められている超電導体性能目標）が、77 K時、高レベルのZr添加でREBCOテープにおいて達成されることができていることが実証されている（V. Selvamanickam, et al., "Low-temperature, High Magnetic Field Critical Current Characteristics of Zr-added (Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol. 25, 125013 (2012))。これらの発見は、REBCOテープを実質的に高レベルのZrでドーピングすることが、実践的条件下、高臨界電流密度および高リフトファクタの両方を産生する可能性を切り開く。しかしながら、高レベルの添加Zrを伴うREBCOテープのリフトファクタは、実質的に、一貫しないことが見出されている。

【0011】

したがって、当技術分野には、実践的動作条件下において、高リフトファクタおよび高臨界電流密度の両方を超電導体内で達成することができる、方法および組成物の必要性がある。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0012】

【非特許文献1】Y. Iijima, et al., Physica C 185, 1959 (1991), X.D. Wu, et al., Appl. Phys. Lett. 67, 2397 (1995), A. Goyal, et al., Appl. Phys. Lett. 69 (1996) p.1795, V. Selvamanickam et al., "High Performance 2 G wire: From R&D to Pilot-scale Manufacturing", IEEE Trans, Appl, Supercond. 19, 3225 (2009)

【非特許文献2】E. M. Gyorgy, et al., "Anisotropic critical currents in Ba₂YCu₃O₇ analyzed using an extended bean model" Appl. Phys. Lett. 55, 283 (1989)

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0013】

本明細書に開示されるある実施形態の概要は、以下に記載される。本項は、単に、読者に、ある実施形態の簡単な概要を提供するために提示され、これらの説明は、本願の範囲を制限するために意図されないことを理解されたい。実際、本開示は、本明細書に記載されない場合がある、種々の実施形態を包含してもよい。

【0014】

超伝導テープは、約30 K時、テープに垂直に印加される、約3 T磁場下、高リフトファクタを達成するように加工されることができる。一実施形態では、超伝導テープは、約30 K

10

においてREBCOテープに垂直に印加される、約3 T磁場下、3.0を上回るまたは4.0を上回るリフトファクタを達成するように加工されることができる。

【0015】

別の実施形態では、超伝導テープは、外部磁場の不在下、77 K時、約4.2 MA/cm²未満またはそれと等しい臨界電流密度を含むように加工される。さらに別の実施形態では、超伝導テープは、c-軸に平行な配向を有する、約3 Tの磁場下、約30 K時、約1.2 MA/cm²を上回るまたはそれと等しい臨界電流密度を含むように加工される。

例えば、本願発明は以下の項目を提供する。

(項目1)

約3 Tの磁場下、約30 K時、約3.0を上回るまたはそれと等しいリフトファクタを備える、超電導体テープ。

20

(項目2)

約32.0原子%を上回るバリウム+ドーパント含有量をさらに備える、項目1に記載の超電導体テープ。

(項目3)

約49.0原子%未満の銅含有量をさらに備える、項目1に記載の超電導体テープ。

(項目4)

前記ドーパント含有量は、少なくとも約1.65原子%であって、前記バリウム含有量は、少なくとも約29.9原子%である、項目2に記載の超電導体テープ。

(項目5)

前記リフトファクタは、約3 Tの磁場下、約30 K時、約4.0を上回るまたはそれと等しい、項目1に記載の超電導体テープ。

30

(項目6)

約33.0原子%を上回るバリウム+ドーパント含有量をさらに備える、項目5に記載の超電導体テープ。

(項目7)

約49.0原子%未満の銅含有量をさらに備える、項目6に記載の超電導体テープ。

(項目8)

前記ドーパント含有量は、少なくとも約1.65原子%であって、前記バリウム含有量は、少なくとも約30.5原子%である、項目6に記載の超電導体テープ。

40

(項目9)

約37.5%を上回るバリウム対バリウム+ドーパント+銅比率、約2.0%未満のドーパント対バリウム+ドーパント+銅比率、および約60.5%未満の銅対バリウム+ドーパント+銅比率をさらに備える、項目1に記載の超電導体テープ。

(項目10)

約0.58を上回るまたはそれと等しい、バリウム対銅比率をさらに備える、項目1に記載の超電導体テープ。

(項目11)

約0.62を上回るまたはそれと等しい、バリウム+ドーパント対銅比率をさらに備える、項目1に記載の超電導体テープ。

50

(項目 1 2)

約 3 8 . 0 % を上回るバリウム対バリウム + ドーパント + 銅比率、約 2 . 5 % 未満のドーパント対バリウム + ドーパント + 銅比率、および約 5 9 . 5 % 未満の銅対バリウム + ドーパント + 銅比率をさらに備える、項目 5 に記載の超電導体テープ。

(項目 1 3)

約 0 . 6 2 を上回るまたはそれと等しい、バリウム対銅比率をさらに備える、項目 5 に記載の超電導体テープ。

(項目 1 4)

約 0 . 6 5 を上回るまたはそれと等しい、バリウム + ドーパント対銅比率をさらに備える、項目 5 に記載の超電導体テープ。

10

(項目 1 5)

外部磁場の不在下、7 7 K 時、約 4 . 2 M A / c m ² 未満またはそれと等しい臨界電流密度をさらに備える、項目 1 に記載の超電導体テープ。

(項目 1 6)

外部磁場の不在下、7 7 K 時、約 3 . 8 M A / c m ² 未満またはそれと等しい臨界電流密度をさらに備える、項目 5 に記載の超電導体テープ。

(項目 1 7)

c - 軸に平行な配向を有する、約 3 T の磁場下、約 3 0 K 時、約 1 2 M A / c m ² を上回る臨界電流密度を備える、超電導体テープ。

(項目 1 8)

前記臨界電流密度は、前記 c - 軸に平行な配向を有する、約 3 T の磁場下、約 3 0 K 時、約 1 5 M A / c m ² を上回る、項目 1 7 に記載の超電導体テープ。

20

(項目 1 9)

前記超電導体テープは、少なくとも約 0 . 9 μ m のフィルム厚を有する、超電導体フィルムを備える、項目 1 7 に記載の超電導体テープ。

(項目 2 0)

R E B C O 超伝導テープを製造する方法であって、
超伝導テープ基板に前駆体蒸気を印加するステップであって、前記前駆体蒸気は、
約 3 3 . 0 原子% を上回るバリウム + ドーパント含有量と、
約 4 9 . 0 原子% 未満の銅含有量と、
を備える、フィルムをもたらす、方法。

30

【図面の簡単な説明】【 0 0 1 6 】

前述の概要ならびに以下の発明を実施するための形態は、添付の図面と併せて熟読されることによって、より深く理解されるであろう。例証目的のためだけに、図面に、ある実施形態が示される。しかしながら、本明細書に開示される本発明の概念は、図に示される精密な配列および器具類に限定されないことを理解されたい。

【図 1】図 1 は、M O C V D H T S テープおよび B Z O ドープ M O C V D テープに一般的磁場と基板テープとの間の角度の関数として、臨界電流密度を図示する。

【図 2】図 2 は、M O C V D によって合成された Z r ドープ超伝導フィルムの断面微小構造を図示する。

40

【図 3】図 3 は、ある実施形態による、フィルムの I C P 分光法によって測定されるとき種の組成物の 1 5 ~ 2 5 モル% Z r 添加 G d Y B C O テープの 3 0 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 4】図 4 は、ある実施形態による、フィルム中の全カチオン (G d 、 Y 、 B a 、 C u 、 Z r) の原子% として表されるバリウムの関数として、1 5 ~ 2 5 モル% Z r 添加 G d Y B C O テープの 3 0 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 5】図 5 は、ある実施形態による、フィルム中の全カチオン (G d 、 Y 、 B a 、 C u 、 Z r) の原子% として表されるジルコニウムの関数として、1 5 ~ 2 5 モル% Z r 添加 G d Y B C O テープの 3 0 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

50

【図 6】図 6 は、ある実施形態による、フィルム中の全カチオン（Gd、Y、Ba、Cu、Zr）の原子%として表されるバリウム + ジルコニウムの関数として、15 ~ 25 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 7】図 7 は、ある実施形態による、フィルム中の全カチオン（Gd、Y、Ba、Cu、Zr）の原子%として表される銅の関数として、15 ~ 25 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 8】図 8 は、ある実施形態による、フィルムの I C P 分光法によって測定されるとき
の種々の組成物の 15 ~ 25 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 T の
磁場下、リフトファクタを図示する。

10

【図 9】図 9 は、ある実施形態による、フィルム内のバリウム対銅比率の関数として、15 ~ 25 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 10】図 10 は、ある実施形態による、フィルム内のバリウム + ジルコニウム対銅比率の関数として、15 ~ 25 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 T の磁場下、リフトファクタを図示する。

【図 11】図 11 は、ゼロ磁場下、77 K における臨界電流密度の関数として、15 ~ 20 モル% Zr 添加 Gd Y B C O テープの 30 K における 3 テスラの磁場下、リフトファクタを図示する。

【発明を実施するための形態】

20

【0017】

少なくとも一実施形態を詳細に説明する前に、本明細書に記載される本発明の概念は、その用途において、以下の説明に記載され、または図面に図示される、構造詳細または構成要素配列に限定されないことを理解されたい。また、本明細書に採用される語句および専門用語は、単に、説明目的のためのものであって、限定と見なされるべきでないことも理解されたい。

【0018】

さらに、説明される特徴のいずれかの 1 つは、別個に、または他の特徴と組み合わせて使用されてもよいことを理解されたい。他の判明システム、方法、特徴、および利点は、本明細書の図面および発明を実施するための形態を検討することによって、当業者に明白である、または明白となるであろう。全てのそのような付加的システム、方法、特徴、および利点は、付随の請求項によって保護されることが意図される。

30

【0019】

本明細書に説明される実施形態の目的の 1 つは、R E B C O テープに垂直に印加される、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、少なくとも約 3 . 0 のリフトファクタを一貫して達成する、超伝導テープを加工することである。本明細書に説明される実施形態の別の目的は、R E B C O テープに垂直に印加される、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、少なくとも約 4 . 0 のリフトファクタを一貫して達成することができる、超伝導テープを加工することである。一実施形態では、R E B C O テープは、M O C V D によって加工される。

【0020】

40

ある実施形態では、R E B C O テープは、基板と、基板を覆う緩衝層と、超伝導フィルムに続くキャッピング層（典型的には、貴金属）と、安定化層（典型的には、銅等の非貴金属）とを含んでもよい。緩衝層は、いくつかの別々のフィルムから成ってもよい。

【0021】

一実施形態では、基板は、ニッケル系または鉄系合金等の高温に耐えることができる、金属合金を含んでもよい。実施例は、H a s t e l l o y (R)、I n c o n e l (R) 合金群、ステンレス鋼合金、またはニッケル - タングステン、およびニッケル - クロム合金が挙げられ得る。基板は、典型的には、薄いテープ、約 25 ~ 100 μ m 厚、約 2 mm ~ 100 mm 幅、および約 1 ~ 10 , 000 メートルの長さの形態であってもよい。基板は、約 0 . 5 ~ 20 nm 表面粗度を伴う平滑表面を産生するために、研磨等の技法によっ

50

て処理されることができる。加えて、別の実施形態では、基板は、公知の R A B i T S (圧延支援 2 軸方向テクスチャ化基板) 技法等によって、2 軸方向にテクスチャ化されるように処理されてもよい。代替として、さらに別の実施形態では、基板は、市販の H a s t e l l o y (R) 、 I n c o n e l (R) 合金群、およびステンレス鋼合金等の非テクスチャ化多結晶であってもよい。

【 0 0 2 2 】

別の実施形態では、緩衝層は、単一層であって、またはより一般には、いくつかのフィルムから作製されてもよい。さらに別の実施形態では、緩衝層は、概して、フィルムの平面内および平面外の両方の結晶軸に沿って整合される、結晶テクスチャを有する、2 軸方向にテクスチャ化されたフィルムを含んでもよい。そのような 2 軸方向テクスチャ化は、イオンビーム支援蒸着 (I B A D) によって遂行されてもよい。例えば、I B A D は、2 軸方向にテクスチャ化された緩衝層を形成し、超伝導特性のための望ましい結晶学的配向を有する、超伝導層を産生するために使用されることができる。

【 0 0 2 3 】

ある実施形態では、酸化マグネシウムは、I B A D フィルムのためのフィルムとして使用されることができ、かつ約 5 ~ 約 5 0 ナノメートル等、約 1 ~ 約 5 0 0 n m であってもよい。緩衝層はまた、I B A D フィルムおよび基板に直接接触し、その間に設置されるように提供される、障壁フィルム等の付加的フィルムを含んでもよい。本実施形態では、障壁フィルムは、アルミナまたはジルコニウム酸 (例えば、イットリア安定化ジルコニア、ジルコン酸ガドリニウム等) 等の酸化物であってもよく、基板を I B A D フィルムから隔離するように機能することができる。障壁フィルムの典型的厚さは、約 1 ~ 約 2 0 0 n m の範囲内であってもよい。

【 0 0 2 4 】

なおもさらに、さらに別の実施形態では、緩衝層はまた、I B A D フィルムにわたって形成されるように、L a M n O ₃ 、 S r T i O ₃ 、 C e O ₂ 等のエピタキシャルに成長されたフィルムを含んでもよい。エピタキシャルに成長されたフィルムは、M g O と R E B C O との間の格子不整合に対応するのに役立ち得る。他の実施形態では、全ての緩衝フィルムは、種々の物理的蒸着、溶液コーティング、または化学蒸着技法によって蒸着されてもよい。

【 0 0 2 5 】

ある実施形態では、超伝導 R E B C O フィルムは、イットリウム、ガドリニウム、ネオジミウム、エルビウム、ユーロピウム、サマリウム、ジスプロシウム、ホルミウム等の単一希土類元素から成ってもよい。別の実施形態では、超伝導 R E B C O フィルムは、任意の組み合わせにおいて、これらの希土類元素のうちの 1 つまたはそれを上回るものから成ってもよい。超伝導フィルムは、約 0 . 5 ~ 1 0 μ m 厚であってもよい。なおも別の実施形態では、R E B C O フィルムは、薄フィルム物理的蒸着技法 (例えば、パルス状レーザ蒸着 (P L D)) 、蒸発またはスパッタリング、化学蒸着 (C V D) 、あるいは化学溶液蒸着 (C S D) を介して、蒸着されることができる。

【 0 0 2 6 】

成分 R E 、 B a 、 C u カチオンに加え、別の実施形態では、ドーパント材料が、超伝導フィルム内に組み込まれる出発源材料に添加され、磁束ピンニングを改善することができる。一実施形態では、超伝導フィルムが、P L D またはスパッタリングによって作製される場合、B a Z r O ₃ 、 B a S n O ₃ 、 B a H f O ₃ 、 B a T i O ₃ 、 B a C e O ₃ 、 R E B a ₂ N b O ₆ 、 R E B a ₂ T a O ₆ 、 C e O ₂ 、 Z r O ₂ 、または Y S Z 等の 1 つまたはそれを上回るドーパントが、前駆体と混合され、焼灼のための標的を形成することができる。代替として、別の実施形態では、ドーパントは、標的の区画として作製されてもよく、または別個の標的の中に作製されてもよい。

【 0 0 2 7 】

ある実施形態では、エキシマーレーザ等の焼灼レーザが、標的にわたって走査するにつれて、R E B C O およびドーパント材料は、ともに蒸着され、フィルムを緩衝基板上に形

10

20

30

40

50

成することができる。代替として、別の実施形態では、超伝導フィルムが、蒸発によって作製される場合、ドーパント材料は、Zr、Ce、Ti、Nb、Hf、Ta、およびSn等の別個の元素として、源内に添加されてもよい。

【0028】

一実施形態では、超伝導フィルムは、金属有機化学蒸着(MOCVD)、金属有機蒸着(MOD)、または化学溶液蒸着(CSD)等の化学蒸着プロセスによって作製されてもよい。これらの実施形態では、Zr、Ce、Ti、Nb、Hf、Ta、およびSn等のドーパントが、出発前駆体中の金属有機物として添加されることができる。例えば、ドーパントは、MOCVDの場合、テトラメチルヘプタノジオネイト(thd)の形態において、あるいはMODまたはCSDの場合、酢酸またはアセチルアセトネートとして、添加されることができる。全前駆体の溶液は、MOCVDの場合、テトラヒドロフラン(THF)、およびMODまたはCSDの場合、トリフルオロ酢酸(TFA)等の溶媒を使用して作製されることができる。

【0029】

ある実施形態では、MOCVDプロセスでは、REBCO前駆体溶液およびドーパント前駆体溶液が、ともに混合され、単一溶液として蒸発器内に送達されてもよい。代替として、REBCO前駆体溶液およびドーパント前駆体溶液は、別個の溶液として蒸発器内に送達されてもよい。別の実施形態では、RE、Ba、Cu、およびドーパントを含有する蒸発された前駆体は、アルゴン等の搬送ガスを用いて送達される。前駆体は、次いで、酸素ガスと混合され、シャワーヘッドを通して、MOCVD反応器の中にも注入されることができる。さらに別の実施形態では、前駆体蒸気は、抵抗または放射加熱器を用いて加熱される、緩衝基板上に蒸着されることができる。結果は、ドーパント化合物の埋め込まれた酸化物を伴う、REBCOフィルムとなる。なおも別の実施形態では、Zrドーパントの使用は、BZOをREBCOフィルム内に形成させる。BZOおよび他のドーパント材料は、REBCOフィルム内のナノ柱または他のナノ構造として形成され、それによって、改良された磁束ピンニングを可能にすることが見出されている(V. Selvamannickam, et al., "Influence of Zr and Ce Doping on Electromagnetic Properties of (Gd, Y)-Ba-Cu-O Superconducting Tapes Fabricated by Metal Organic Chemical Vapor Deposition", Physica C 469, 2037 (2009); V. Selvamannickam, et al., "Enhanced critical currents in high levels of Zr-added (Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol. 26, 035006 (2013); V. Selvamannickam, et al., "Low-temperature, High Magnetic Field Critical Current Characteristics of Zr-added (Gd, Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol. 25, 125013 (2012))。

【0030】

別の実施形態では、REBCOテープはまた、キャッピング層と、安定化層とを含んでもよく、これは、低抵抗界面および電気安定化を提供し、実践的使用の間の超電導体焼損を防止するのに役立つために実装されることができる。さらに別の実施形態では、貴金属が、キャッピング層として使用され、安定化層と超伝導層との間の望ましくない相互作用を防止することができる。いくつかの貴金属として、金、銀、白金、およびパラジウムが挙げられ得る。ある実施形態では、キャッピング層は、約0.01 μm~約20 μmの厚さ、または約1 μmの厚さ~約3 μmの厚さであってもよい。キャッピング層は、スパッタリング、蒸発、または電気蒸着によって蒸着されることができる。

【0031】

10

20

30

40

50

一実施形態では、安定化層は、保護ノシャント層として機能し、過酷な環境条件および超伝導性クエンチに対する安定性を向上させてもよい。層は、高密度および熱的かつ電氣的に伝導性であってもよく、超伝導層の故障の場合または超伝導層の臨界電流を超える場合、電流をバイパスするように機能することができる。また、事前に形成された銅細片を超伝導テープ上に積層すること、またははんだ等の中間接合材料を使用すること等によって、種々の厚フィルムおよび薄フィルム形成技法のうちの任意の1つによって形成されてもよい。

【0032】

一実施形態では、超伝導フィルム（キャッピングおよび安定化層を伴わない）の組成物は、ICP分光法を介して、測定されることができる。別の実施形態では、超伝導テープの臨界電流密度は、77 K時、ゼロ印加磁場下、かつ約4.2 K～77 Kの温度時、種々の磁場の存在下、4プローブ技法によって測定されることができる。別の実施形態では、磁場内臨界電流測定が、テープ法線に平行ならびに垂直な磁場の配向を用いて行われてもよい。加えて、さらに別の実施形態では、臨界電流密度は、中間磁場配向において測定されてもよい。任意の温度および磁場におけるリフトファクタが、その条件におけるテープの臨界電流とゼロ印加磁場下、77 K時、臨界電流の比率として計算されることができる。

【0033】

図3を参照すると、単なる一例として、一実施形態では、約30 K時、約3 T磁場下、種々の超伝導体フィルム組成物のリフトファクタが、約15.0%～約24.5% RE (Gd + Y)、約29.0%～約38.5% Ba + Zr、および約46.5%～約56.0% Cuの組成物範囲にわたって、マップされることができる。これらのフィルムは、THF溶媒中で混合されたGd、Y、Ba、およびCuのテトラメチルヘプタノディオネイト前駆体を使用して、MOCVDプロセスによって加工されることができる。前駆体配合表は、付加的15～25モル% Zrを含むことができる。前駆体中の全カチオン（RE、Ba、Cu、Zr）が、フィルム内に組み込まれる場合、15% Zrは、フィルム内の全カチオンの2.4原子%に等しいZr含有量に対応し得る。溶液は、約270においてフラッシュ蒸発され、前駆体は、LaMnO₃-緩衝IBAD MgO系Hastelloy基板上に蒸着されることができる。蒸着は、圧力2～3トルにおいて、温度750～850で行われることができる。

【0034】

図3に図示されるように、ある実施形態では、約32.0原子%を上回るバリウム+ジルコニウム含有量および約49.0原子%未満の銅含有量を有する、超伝導テープは、約30 K時、約3 T磁場下、約3.0を上回るリフトファクタを呈することができる。一実施形態では、約30 K時、約3 T下で約3.0を上回るリフトファクタを呈するサンプルの場合、フィルム内のZr含有量は、少なくとも1.65原子%であり得、バリウム含有量は、少なくとも29.9%であり得る。別の実施形態では、約33.0原子%を上回るバリウム+ジルコニウム含有量、約49.0%原子%未満の銅含有量を有する、超伝導テープは、約30 K時、約3 T磁場下で約4.0を上回るリフトファクタを呈することができる。一実施形態では、約30 K時、約3 T下、約4.0を上回るリフトファクタを呈するサンプルの場合、フィルム内のZr含有量は、少なくとも1.65原子%であり得、およびバリウム含有量は、少なくとも30.5原子%であり得る。

【0035】

約30 K時、約3 T磁場下、約3.0および約4.0を上回るリフトファクタを達成するためのフィルム内のバリウム、ジルコニウム、バリウム+ジルコニウム、および銅の限界値が、単なる一例として、それぞれ、図4、5、6、および7に図示される。例えば、図4は、約30 K時、約3 T磁場下、約3.0を上回るリフトファクタを達成するために必要なバリウムの限界値を図示する。一実施形態では、約29.9原子%を上回るBa含有量は、3を上回るリフトファクタを達成することができる。別の実施形態では、約30.5原子%を上回るBa含有量は、4を上回るリフトファクタを達成することができる。

図 5 は、単なる一例として、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 および約 4.0 を上回る リフトファクタ を達成するために必要なジルコニウムの限界値を図示する。一実施形態では、約 1.65 原子% を上回る Zr 含有量は、3 および 4 の両方を上回る リフトファクタ を達成することができる。図 6、単なる一例として、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 および約 4.0 を上回る リフトファクタ を達成するために必要なバリウム + ジルコニウムの限界値を図示する。一実施形態では、約 31.5 原子% を上回る Ba + Zr 含有量は、3 を上回る リフトファクタ を達成することができる。別の実施形態では、約 33.0 原子% を上回る Ba + Zr 含有量は、4 を上回る リフトファクタ を達成することができる。図 7 は、単なる一例として、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 および約 4.0 を上回る リフトファクタ を達成するために必要な銅の限界値を図示する。一実施形態では、約 51.0 % 原子% 未満の Cu 含有量は、3 を上回る リフトファクタ を達成することができる。別の実施形態では、約 50.0 原子% 未満の Cu 含有量は、4 を上回る リフトファクタ を達成することができる。

10

【0036】

図 8 を参照すると、単なる一例として、一実施形態では、Ba + Zr + Cu 値に正規化された種々の超電導体フィルム組成物の、約 30 K 時、約 3 T 磁場下の リフトファクタ が、約 1.0 % ~ 約 10.0 % Zr、約 34.0 % ~ 約 43.0 % Ba、および約 56.0 % ~ 約 65.0 % Cu の組成物範囲にわたってマップされ得る。

【0037】

図 8 に図示されるように、ある実施形態では、Ba + Cu + Zr の総含有量の約 37.5 % を上回るバリウム含有量、Ba + Cu + Zr の総含有量の約 60.5 % 未満の銅含有量、および Ba + Cu + Zr の総含有量の約 2 % 未満のジルコニウム含有量を有する、超伝導テープは、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 を上回る リフトファクタ を呈することができる。別の実施形態では、Ba + Cu + Zr の総含有量の約 38 % を上回るバリウム含有量、Ba + Cu + Zr の総含有量の約 59.5 % 未満の銅含有量、および Ba + Cu + Zr の総含有量の約 2.5 % 未満の Zr 含有量を有する、超伝導テープは、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 4.0 を上回る リフトファクタ を呈することができる。

20

【0038】

約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3 および約 4 を上回る リフトファクタ を達成するためのフィルム内のバリウム対銅およびバリウム + ジルコニウム対銅の比率が、単なる一例として、それぞれ、図 9 および 10 に図示される。例えば、図 9 は、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 を上回る リフトファクタ を達成するために必要なバリウム対銅の比率を図示する。一実施形態では、少なくとも約 0.58 を上回るまたはそれと等しい Ba 対 Cu 比率は、3 を上回る リフトファクタ を達成することができる。別の実施形態では、少なくとも約 0.62 を上回るまたはそれと等しい Ba 対 Cu 比率は、4 を上回る リフトファクタ を達成することができる。図 10 は、単なる一例として、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3 および約 4 を上回る リフトファクタ を達成するために必要なバリウム + ジルコニウム対銅の比率を図示する。一実施形態では、少なくとも約 0.62 を上回るまたはそれと等しい Ba + Zr 対 Cu 比率は、3 を上回る リフトファクタ を達成することができる。別の実施形態では、少なくとも約 0.65 を上回るまたはそれと等しい Ba + Zr と Cu 含有量は、4 を上回る リフトファクタ を達成することができる。

30

40

【0039】

図 11 は、77 K 時、0 T の磁場下、臨界電流密度 (J_c) の範囲 (例えば、2 ~ 5 MA/cm²) を有する、約 30 K 時、約 3 T の磁場下 (テープに垂直に印加される)、約 15 ~ 25 モル% Zr 添加を伴ういくつかの (Gd、Y) - Ba - Cu - O テープの リフトファクタ を図示する。予想外にも、77 K 時、0 T 磁場下、4.2 MA/cm² 未満の臨界電流密度を有する、それらの超伝導テープのみ、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 3.0 を上回る リフトファクタ を呈し得る。さらに、77 K 時、0 T 磁場下、3.8 MA/cm² 未満の臨界電流密度を有する、それらの超伝導テープのみ、約 30 K 時、約 3 T 磁場下、約 4.0 を上回る リフトファクタ を呈し得る。超電導体研究における傾向は、ゼロ磁

50

場下、77 K時、臨界電流密度を増加させることである。したがって、ゼロ磁場下、77 K時、より高い臨界電流密度は、実践的条件において高リフトファクタを達成するという観点から望ましくない場合があるという発見は、予測外であって、以前には、当技術分野において予想されていない。

【0040】

本願の別の目的は、約30 K時、約3 T磁場下、超電導テープにおいて、約3.0を上回るリフトファクタおよび高絶対臨界電流密度値の両方を達成することである。一実施形態では、約77 K時、約0 T磁場下、テープの臨界電流密度は、約30 K時、約3 T磁場下、約800 A/cm - 幅にわたって臨界電流密度を達成するためには十分に高くあり得る。例えば、約30.17% Ba、約50.7% Cu、約8.86% Y、約7.5% Gd、および約1.77% Zrのカチオン組成物を伴う、約0.91 μm厚の超伝導フィルムは、77 K時、0 T下、約2.76 MA/cm²の臨界電流密度と、約30 K時、約3 T下、約3.4のリフトファクタとを呈し得る。故に、テープの臨界電流は、約30 K時、約3 T下、約851 A/cmであり得る。なおもさらなる実施形態では、約31.5原子%を上回るバリウム+ジルコニウム含有量、約51原子%未満の銅含有量、および約19.5原子%未満の希土類（例えば、イットリウム+ガドリニウム）含有量を有する、超伝導テープは、約30 K時、約3 T磁場下、約800 A/cm - 幅にわたって臨界電流密度を呈し得る。

10

【0041】

別の実施形態では、臨界電流密度とリフトファクタとの間の前述で識別された相関は、約60 Kを下回る温度で観察され得る。例えば、約0.85 μm厚の超伝導フィルムは、77 K時、0 T下、約3.16 MA/cm²の臨界電流密度と、3 T下、59 K時、約1.25、54 K時、1.57、49 K時、1.90、38 K時、2.99、30 K時、4.1、25 K時、4.64、および20 K時、5.67のリフトファクタとを呈し得る。さらに別の実施形態では、約0.91 μmのフィルム厚を伴う超伝導フィルムは、77 K時、0 T下、約4.66 MA/cm²の臨界電流密度と、3 T下、59 K時、約0.61、54 K時、0.77、49 K時、0.92、39 K時、1.29、30 K時、1.68、25 K時、1.90、および20 K時、2.21のリフトファクタとを呈し得る。

20

【0042】

さらに別の実施形態では、類似相関は、約60 Kを下回る温度において、超伝導テープ組成物とリフトファクタとの間にも存在し得る。例えば、約31.49% Ba、約50.88% Cu、約8.56% Y、約7.3% Gd、および約1.75% Zrのカチオン組成物を伴う0.85 μm厚の超伝導フィルムは、77 K時、0 T下、約3.16 MA/cm²の臨界電流密度と、3 T下、59 K時、約1.25、54 K時、1.57、49 K時、1.90、38 K時、2.99、30 K時、4.1、25 K時、4.64、および20 K時、5.67のリフトファクタとを呈し得る。

30

【0043】

Ba + Zr - Cu比率は、リフトファクタに最も強い影響を及ぼし得る。したがって、他の実施形態では、超伝導REBCOテープは、以下のRE元素：Y、Gd、Dy、Ho、Er、Tb、Yb、Eu、Nd、またはSmのうちの1つを含んでもよい。超伝導テープのタイプ毎に、図3および11に観察されるように、臨界電流密度とリフトファクタとの間に類似相関が存在し得る。例えば、Zrドープを伴う(Gd、Dy) - Ba - Cu - O組成物の約0.91 μm厚の超伝導フィルムは、77 K時、0 T下、約2.61 MA/cm²の臨界電流密度と、約30 K時、約3 T下、約3.0のリフトファクタを呈し得る。

40

【0044】

本願のさらに別の目的は、超電導テープにおいて、約30 K時、約3 T磁場下、約4.0を上回るリフトファクタおよび高絶対臨界電流密度値の両方を達成することである。一実施形態では、約77 K時、約0 T磁場下、テープの臨界電流密度は、約30 K時、約3 T磁場下、約2160 A/12 mm - 幅にわたって臨界電流を達成するために十分に高

50

くあり得る。例えば、以下の表 1 は、異なる概算カチオン組成物を有する種々の $0.9 \mu\text{m}$ 厚の超伝導フィルムの臨界電流密度およびリフトファクタを図示する。

【 0 0 4 5 】

【表 1】

テープ #	Cu %	Y %	Zr %	Ba %	Gd %	Jc (77 K, 0 T)	揚力係数 (30K, 3T)	Jc (30 K, 3 T)
1	49.6	9.4	1.7	31.3	8.0	2.84	4.39	12.47
2	47.2	9.7	3	31.1	9.1	3.54	4.58	16.21
3	47.5	9.8	2.4	31.1	9.2	3.76	4.09	15.38
4	46.6	9.1	2.4	33.3	8.6	1.93	6.22	12.01
5	46.7	9.6	3.3	31.3	9.1	2.30	5.69	13.09
6	47.2	9.2	2.5	32.3	8.8	3.10	6.45	20.0

表1REBCO超伝導フィルムの揚力係数

【 0 0 4 6 】

故に、テープ 1 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 1346 A / 12 mm であり得る。テープ 2 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 1751 A / 12 mm であり得る。テープ 3 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 1661 A / 12 mm であり得る。テープ 4 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 1297 A / 12 mm であり得る。テープ 5 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 1413 A / 12 mm であり得る。テープ 6 の臨界電流は、約 30 K 時、約 3 T 下、約 2160 A / 12 mm であり得る。

【 0 0 4 7 】

他のドーパントも、Zr と同様に等しく機能し得る。したがって、さらに他の実施形態では、超伝導テープは、以下の成分：ニオブ、タンタル、ハフニウム、スズ、セリウム、およびチタンのうちの 1 つまたはそれを上回るものでドーパされる。超伝導テープのタイプ毎に、図 3 および 11 に観察されるように、臨界電流密度とリフトファクタとの間に類似相関が存在し得る。

【 0 0 4 8 】

前述の説明は、例証であって、限定ではないことが意図されることを理解されたい。材料は、任意の当業者が、本明細書に説明される本発明の概念を作製および使用することを可能にするために提示されており、特定の実施形態の文脈において提供され、その変形例は、当業者に容易に明白になるであろう（例えば、開示される実施形態のうちのいくつかは、相互に組み合わせられて使用されてもよい）。多くの他の実施形態は、前述の説明の精査に応じて、当業者に明白となるであろう。本発明の範囲は、したがって、添付の請求項とともに、そのような請求項の権利が付与される均等物の全範囲を参照して判定されるべきである。添付の請求項では、用語「including」および「in which」は、個別の用語「comprising」および「wherein」の平易な英語均等物として使用される。

【実施例】

【 0 0 4 9 】

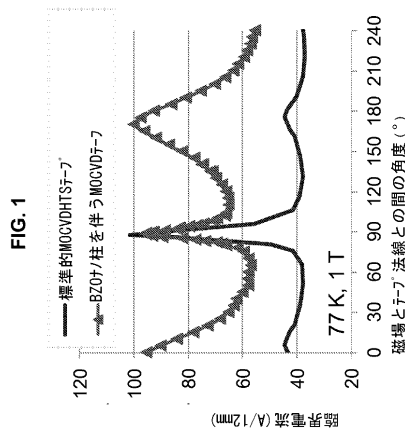
アルミナおよびイットリア緩衝層を伴う、Hastelloy C-276 テープが、室温において、イオンビーム支援蒸着 (IBAD) によって、MgO でコーティングされ、2 軸方向にテクスチャ化されたフィルムをもたらした。ホモエピタキシャル MgO および LaMnO_3 が、温度範囲 600 ~ 800 °C において、マグネトロンスパッタリングによって、IBAD MgO 層上に蒸着された。緩衝テープが、Zr 添加を伴う GdYBCO フィルムの MOCDV のために使用された。Zr_{0.15}Gd_{0.6}Y_{0.6}Ba₂Cu_{2.3} のカチオン組成物を伴うテトラメチルヘプタノディオネイト前駆体が、モル濃度 0.05 M / L において、テトラヒドロフランの溶媒中に溶解された。前駆体溶液が、流速 2.5 mL / 分で送達され、270 °C でフラッシュ蒸発され、アルゴンのガス中に搬送され、酸素と混合され、次いで、線形シャワーヘッドを使用して、反応器の中に注入され

た。前駆体蒸気は、約 830 の温度範囲において、反応器圧力 2.3 トルで、速度 2.1 cm / 分で移動する緩衝 I B A D テープ上に蒸着された。超電導体フィルムの厚さは、0.925 μm であると断面走査電子顕微鏡法によって測定された。フィルムのカチオン原子組成物は、31.35 % B a、49.57 % C u、8.03 % G d、9.36 % Y、および 1.69 % Z r であると I C P 分光分析によって判定された。テープの臨界電流密度は、77 K 時、0 T 下、2.84 MA / cm^2 であると測定された。30 K 時、テープに垂直に印加される 3 T 磁場下、リフトファクタ 4.4 が、1153 A / cm の臨界電流に対応して達成された。

【 0 0 5 0 】

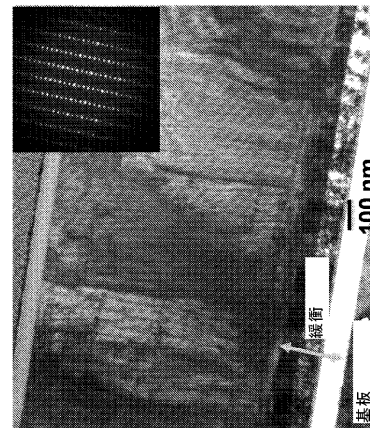
Z r_{0.15} G d_{0.6} Y_{0.6} B a₂ C u_{2.2} のカチオン組成物を伴うテトラメチルヘプタノディオネイト前駆体が、モル濃度 0.05 M / L において、テトラヒドロフランの溶媒中に溶解された。前駆体溶液は、流率 2.5 mL / 分で送達され、270 でフラッシュ蒸発され、アルゴンのガス中に搬送され、次いで、酸素と混合され、線形シャワーヘッドを使用して、反応器の中に注入された。前駆体蒸気は、約 800 の温度範囲において、反応器圧力 2.3 トルで、速度 2.1 cm / 分で移動する緩衝 I B A D テープ上に蒸着された。超電導体フィルムの厚さは、0.91 μm であると断面走査電子顕微鏡法によって測定された。フィルムのカチオン原子組成物は、30.29 % B a、51.47 % C u、8.12 % G d、8.55 % Y、および 1.57 % Z r であると I C P 分光分析によって判定された。テープの臨界電流密度は、77 K 時、0 T 下、4.37 MA / cm^2 であると測定される。30 K 時、テープに垂直に印加される 3 T 磁場下、リフトファクタ 1.8 が、728 A / cm の臨界電流に対応して達成された。

【 図 1 】



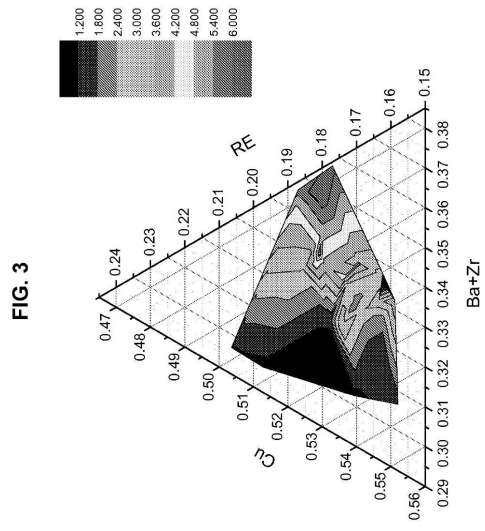
【 先行技術 】

【 図 2 】

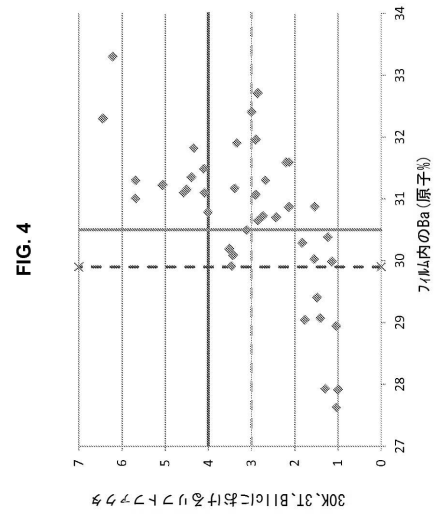


【 先行技術 】

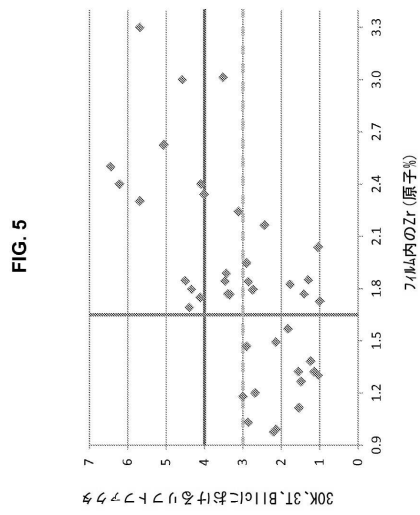
【 図 3 】



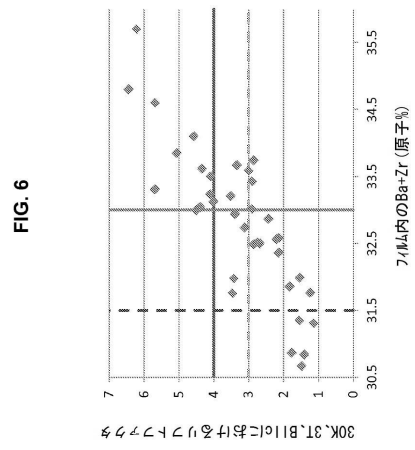
【 図 4 】



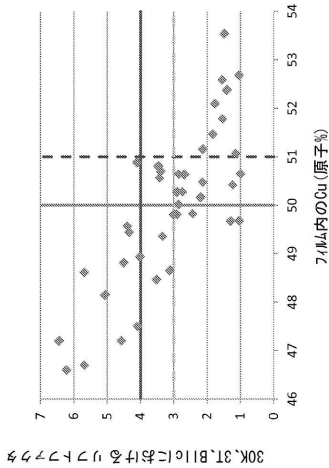
【 図 5 】



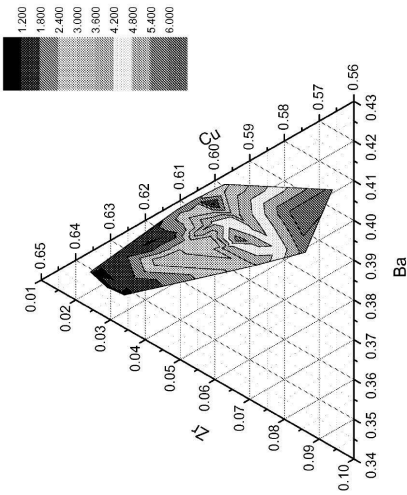
【 図 6 】



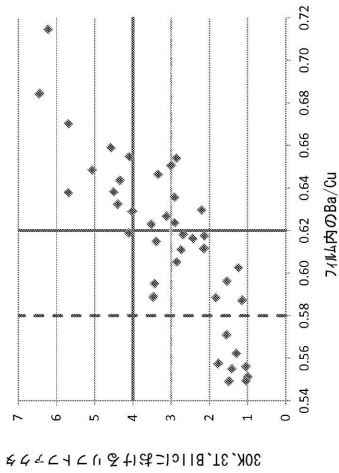
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】

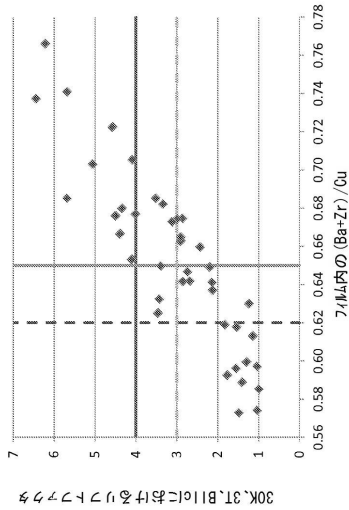
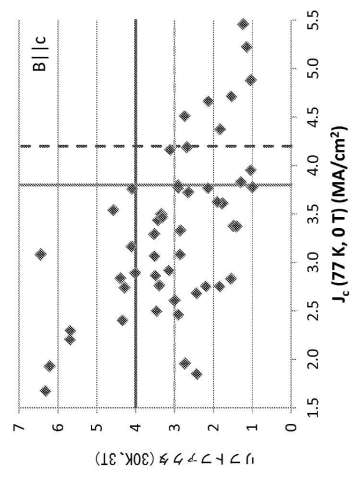


FIG. 11



 フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
 C 0 1 G 25/00 (2006.01) C 0 1 G 25/00

審査官 和田 財太

(56)参考文献 V. Selvamanickam, et al., Enhanced critical currents in (Gd,Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes with high levels of Zr addition, Superconductor Science and Technology, IOP PUBLISHING, 2013年 1月21日, Vol.26, p.1-p.9
 V. Selvamanickam, et al., The low-temperature, high-magnetic-field critical current characteristics of Zr-added (Gd,Y)Ba₂Cu₃O_x superconducting tapes, Superconductor Science and Technology, IOP PUBLISHING, 2012年10月26日, Vol.25, p.1-p.7

(58)調査した分野(Int.Cl., D B名)
 H 0 1 B 1 2 / 0 6
 C 2 3 C 1 6 / 4 0
 H 0 1 B 1 3 / 0 0
 H 0 1 L 3 9 / 2 4
 C 0 1 G 1 / 0 0
 C 0 1 G 2 5 / 0 0