

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02010/140400

発行日 平成24年11月15日(2012.11.15)

(43) 国際公開日 平成22年12月9日(2010.12.9)

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)
 H O 1 L 39/22 (2006.01) H O 1 L 39/22 Z A A D 4 M 1 1 3

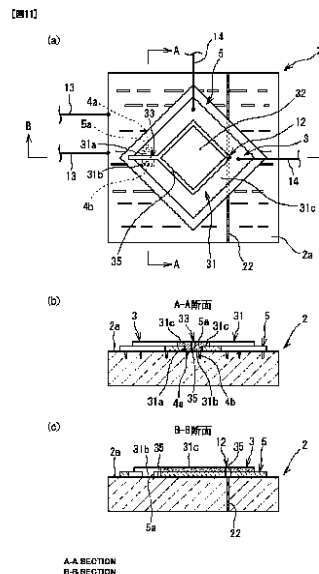
審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 28 頁)

出願番号	特願2011-518329 (P2011-518329)	(71) 出願人	504132272 国立大学法人京都大学
(21) 国際出願番号	PCT/JP2010/053310		京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(22) 国際出願日	平成22年3月2日(2010.3.2)	(74) 代理人	110000280 特許業務法人サンクレスト国際特許事務所
(31) 優先権主張番号	特願2009-133315 (P2009-133315)	(72) 発明者	前野 悦輝 日本国京都府京都市左京区吉田本町 国立 大学法人京都大学大学院理学研究科内
(32) 優先日	平成21年6月2日(2009.6.2)	(72) 発明者	寺嶋 孝仁 日本国京都府京都市左京区吉田本町 国立 大学法人京都大学低温物質科学研究センター 一内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	中村 壮智 日本国京都府京都市左京区吉田本町 国立 大学法人京都大学大学院理学研究科内 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 パイ接合SQUID、及び超伝導接合構造の製造方法

(57) 【要約】

スピン三重項超伝導体とスピン一重項超伝導体とを用いた新方式のパイ接合を有するパイ接合SQUIDを提供する。[スピン一重項超伝導体/スピン三重項超伝導体/スピン一重項超伝導体]のパイ接合を有する超伝導ループからなるパイ接合SQUIDである。このパイ接合SQUIDは、スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板2と、当該基板の表面に形成されたスピン一重項超伝導体のループ層31と、を有して形成されている。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

超伝導接合を有する超伝導ループによって構成された S Q U I D であって、
前記超伝導接合が、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合であることを特徴とするパイ接合 S Q U I D。

【請求項 2】

スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板と、
当該基板の表面に形成されたスピン一重項超伝導体のループ層と、
を有し、

前記ループ層は、前記基板に対して実質的に接合されていないループ本体領域と、前記基板に対して接合するための第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域と、を備え、

前記第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域それぞれが前記基板と接合することで、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されている

請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 3】

前記基板は、スピン三重項超伝導体と常伝導体との共晶によって形成され、
スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体との接合に、前記基板が有する前記常伝導体の導電性を利用した

請求項 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 4】

前記スピン三重項超伝導体は、 Sr_2RuO_4 である請求項 1 又は 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 5】

前記共晶は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶である請求項 3 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 6】

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して平行な基板表面に形成されている請求項 5 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 7】

前記基板は、 Sr_2RuO_4 結晶、又は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶、によって形成され、

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して垂直な基板表面に形成されている請求項 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 8】

前記ループ層は、前記基板表面上に、スピン一重項超伝導体となる物質を蒸着によって形成した蒸着膜である請求項 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 9】

前記基板には、ループ層のループ内側位置における磁束の透過を、当該基板において容易にするための磁束透過部が設けられている請求項 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 10】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる複数の基板分割片を接着材料によって接着してなり、

前記磁束透過部は、前記基板における前記接着材料の部分である請求項 9 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 11】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる基板本体を、磁束が容易に透過する材料に埋め込んで形成され、

前記磁束透過部は、前記基板において磁束が容易に透過する前記材料の部分である請求項 9 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 12】

10

20

30

40

50

前記磁束透過部は、前記基板に形成された孔である請求項 9 記載のパイ接合 S Q U I D
。

【請求項 1 3】

超伝導接合構造の製造方法であって、
スピン三重項超伝導体となる物質の結晶バルクを加工して、基板を形成する基板形成工程と、

前記基板表面にスピン一重項超伝導体となる物質からなる層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、

を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 4】

超伝導接合構造の製造方法であって、
スピン三重項超伝導体になる物質と常伝導体との共晶の表面に析出した常伝導体のうち、
接合用の常伝導体を選択する選択工程と、

選択した接合用の常伝導体の少なくとも一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆う層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、

を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 5】

前記選択工程では、互いに離間する対の接合用常伝導体を選択し、

前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した対の接合用常伝導体の対間隙において離間しているとともに、選択した対の接合用常伝導体それぞれをスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 6】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体上において離間しているとともに、選択した当該接合用常伝導体の一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 7】

前記共晶の表面に析出した常伝導体のうち、選択した接合用常伝導体以外の常伝導体を絶縁膜で覆う絶縁膜形成工程と、を更に含み、

前記スピン一重項超伝導体膜形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体と、前記絶縁膜の少なくとも一部とを、前記スピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 ~ 1 6 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 8】

前記絶縁膜形成工程では、選択した接合用常伝導体の位置に開口部が形成された絶縁膜を、前記共晶の表面に形成する

請求項 1 7 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 9】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程では、前記スピン三重項超伝導体と前記スピン一重項超伝導体とによって、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されるように、前記層を形成する

請求項 1 3 ~ 1 8 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、パイ接合 S Q U I D、及び超伝導接合構造の製造方法に関するものである。

【背景技術】

【0 0 0 2】

S Q U I D (Superconducting Quantum Interference Device : 超伝導量子干渉素子)

10

20

30

40

50

は、1個以上のジョセフソン接合（超伝導接合）を持つ超伝導体のループとして構成された素子である。

従来のSQUIDとしては、印加電流がゼロのとき接合部における超伝導位相差がゼロである「ゼロ接合SQUID」が一般的である。ゼロ接合SQUIDには、通常のスピン一重項のs波超伝導体を用いられ、磁気センサ、脳磁計、地震計などに既に広く実用化されている。

【0003】

一方、接合部における超伝導位相差がゼロではなく、 π になる「パイ接合SQUID」は、ゼロ接合SQUIDと同様に、超高感度の磁気センサなどとして有用であるだけでなく、正または負の半磁束量子または半整数磁束量子を閉じこめる性質を用いた量子ビット（QUBIT）としての応用が特に期待されている。

10

このようなパイ接合SQUIDの原理については、非特許文献1に記載されている。

【0004】

パイ接合SQUIDの方式としては、これまでに二種類実証されており、一つは、非特許文献2に記載されたものであり、もう一つは、非特許文献3に記載されたものである。

前者のパイ接合SQUIDは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ などの高温超伝導体とニオブ（Nb）などの通常超伝導体とを接合して構成されている。

後者のパイ接合SQUIDは、ニオブ（Nb）などの通常超伝導体と強磁性金属薄膜とを接合して構成されている。

20

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin and A. Barone, Vortices with half magnetic flux quanta in "heavy-fermion" superconductors, Physical Review B, VOLUME 36, NUMBER 1, 1 JULY 1987, pp.235-238.

【非特許文献2】J.R. KIRTLEY, C.C. TSUEI, A.ARIANDO, C.J.M. VERWIJS, S.HARKEMA AND H.HILGENKAMP, Angle-resolved phase-sensitive determination of the in-plane gap symmetry in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, [online], 5 February 2006, <www.nature.com/naturephysics>. (Nature Physics, VOLUME 2, MARCH 2006, pp.190-194.)

【非特許文献3】A. Bauer, J. Bentner, M. Aprili, M.L. Della Rocca, M. Reinwald, W. Wegscheider, and C. Strunk, Spontaneous Supercurrent Induced by Ferromagnetic Junctions, Physical Review Letters, VOLUME 92, NUMBER 21, 26 MAY 2004, pp.217001-1-4.

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

従来のパイ接合SQUIDの二方式は、いずれもスピン一重項超伝導体を用いるものであり、スピン三重項超伝導体を用いるものは実証されていない。

【0007】

また、従来のパイ接合SQUIDの二方式では、いずれも、薄膜層同士の接合が必要であり、その構造上、製作には高度な技術が必要である。

40

【0008】

本発明は、スピン三重項超伝導体が生じる性質を利用して、スピン三重項超伝導体とスピン一重項超伝導体とを用いた新方式のパイ接合SQUIDを提供することを目的とする。また、本発明の他の目的は、構造が比較的強固であるとともに製作が比較的容易であるパイ接合SQUIDを提供することである。

さらに、本発明は、超伝導接合構造の新たな製造方法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】

【0009】

本発明は、超伝導接合を有する超伝導ループによって構成されたSQUIDであって、

50

前記超伝導接合が、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合であることを特徴とするパイ接合 S Q U I D である。

【 0 0 1 0 】

スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板と、当該基板の表面に形成されたスピン一重項超伝導体のループ層と、を有し、前記ループ層は、前記基板に対して実質的に接合されていないループ本体領域と、前記基板に対して接合するための第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域とを備え、前記第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域それぞれが前記基板と接合することで、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されているのが好ましい。

【 0 0 1 1 】

前記基板は、スピン三重項超伝導体と常伝導体との共晶によって形成され、スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体との接合に、前記基板が有する前記常伝導体の導電性を利用するのが好ましい。

10

【 0 0 1 2 】

前記スピン三重項超伝導体は、 Sr_2RuO_4 であるのが好ましい。

前記基板を、スピン三重項超伝導体と常伝導体との共晶によって形成する場合、当該共晶は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶であるのが好ましい。

【 0 0 1 3 】

前記基板は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶によって形成され、前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して平行な基板表面に形成されているものとするができる。

20

【 0 0 1 4 】

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 結晶、又は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して垂直な基板表面に形成されているものとするができる。

【 0 0 1 5 】

前記ループ層は、前記基板表面上に、スピン一重項超伝導体となる物質を蒸着によって形成した蒸着膜であるのが好ましい。

【 0 0 1 6 】

前記基板には、ループ層のループ内側位置における磁束の透過が特定の位置で起こるように、当該基板において透過を容易にするための磁束透過部が設けられているのが好ましい。磁束透過部としては、半磁束量子に対応する磁束が容易に検出できるように微小面積の非超伝導体の領域を設けることが望ましい。

30

【 0 0 1 7 】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる複数の基板分割片を接着材料によって接着してなり、前記磁束透過部は、前記基板における前記接着材料の部分であるのが好ましい。また、前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる基板本体を、磁束が容易に透過する材料に埋め込んで形成され、前記磁束透過部は、前記基板において磁束が容易に透過する前記材料の部分であるのが好ましい。あるいは、前記磁束透過部は、前記基板に形成された孔としてもよい。

【 0 0 1 8 】

本発明に係る超伝導接合構造の製造方法は、スピン三重項超伝導体となる物質の結晶バルクを加工して、基板を形成する基板形成工程と、前記基板表面にスピン一重項超伝導体となる物質からなる層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、を含む。

40

【 0 0 1 9 】

他の観点からみた超伝導接合構造の製造方法は、スピン三重項超伝導体になる物質と常伝導体との共晶の表面に析出した常伝導体のうち、接合用の常伝導体を選択する選択工程と、選択した接合用の常伝導体の少なくとも一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆う層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、を含む。

【 0 0 2 0 】

前記選択工程では、互いに離間する対の接合用常伝導体を選択し、前記スピン一重項超

50

伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した対の接合用常伝導体の対間隙において離間しているとともに、選択した対の接合用常伝導体それぞれをスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものであるのが好ましい。

あるいは、前記選択工程で接合用常伝導体を選択し、前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体上において離間しているとともに、選択した当該接合用常伝導体の一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものであってもよい。

【0021】

前記共晶の表面に析出した常伝導体のうち、選択した接合用常伝導体以外の常伝導体を絶縁膜で覆う絶縁膜形成工程と、を更に含み、前記スピン一重項超伝導体膜形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体と、前記絶縁膜の少なくとも一部とを、前記スピン一重項超伝導体となる物質で覆うものであるのが好ましい。

10

【0022】

前記絶縁膜形成工程では、選択した接合用常伝導体の位置に開口部が形成された絶縁膜を、前記共晶の表面に形成するのが好ましい。

【0023】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程では、前記スピン三重項超伝導体と前記スピン一重項超伝導体とによって、[スピン一重項超伝導体/スピン三重項超伝導体/スピン一重項超伝導体]のパイ接合を有する超伝導ループが形成されるように、前記層を形成することで、パイ接合SQUIDが得られる。

20

【発明の効果】

【0024】

パイ接合超伝導量子干渉素子に係る本発明によれば、スピン三重項超伝導体とスピン一重項超伝導体とを用いた新方式のパイ接合を有するパイ接合超伝導量子干渉素子が得られる。

また、スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板の表面に、スピン一重項超伝導体のループ層を形成した場合、比較的強固な構造で、製作が比較的容易となる。

【0025】

超伝導接合構造の製造方法に係る本発明によれば、スピン三重項超伝導体とスピン一重項超伝導体との接合構造が得られる。

30

また、スピン三重項超伝導体になる物質と常伝導体との共晶の表面に析出した析出常伝導体を、スピン三重項超伝導体とスピン一重項超伝導体との接合に利用して接合箇所での導電性を確保した場合、スピン三重項超伝導体表面の導電性が悪くても、両者の確実な接合が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】(a)は実施形態に係るパイ接合構造を示す断面図であり、(b1)~(b4)は、当該パイ接合構造の製造工程を示す工程図である。

【図2】層状ルテニウム酸化物(Sr_2RuO_4)の結晶構造を示す図である。

【図3】 Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面の光学顕微鏡写真である。

40

【図4】実施形態に係るパイ接合構造の臨界電流 I_c -温度 T 特性を示す図である。

【図5】実施形態に係るパイ接合構造の位相差を示す図である。

【図6】パイ接合SQUIDの概略図である。

【図7】第1例に係るパイ接合SQUIDの製法における前処理工程を示す図である。

【図8】第1例に係るパイ接合SQUIDの製法における選択工程を示す図である。

【図9】第1例に係るパイ接合SQUIDの製法における絶縁膜形成工程を示す図である。

。

【図10】第1例に係るパイ接合SQUIDの製法におけるPb膜形成工程を示す図である。

。

【図11】第1例に係るパイ接合SQUIDの製法におけるPb膜加工工程を示す図であ

50

る。

【図12】第2例に係るパイ接合SQUIDの製法における絶縁膜形成工程を示す図である。

【図13】第2例に係るパイ接合SQUIDの製法におけるPb膜形成工程を示す図である。

【図14】第2例に係るパイ接合SQUIDの製法におけるPb膜加工工程を示す図である。

【図15】(a)は接合構造の他の例を示す断面図であり、(b)は当該他の例の斜視図である。

【図16】第3例に係るパイ接合SQUIDの製法における選択工程を示す図である。

【図17】第3例に係るパイ接合SQUIDの製法においてPb膜が形成された状態を示す図である。

【図18】変形例に係るパイ接合SQUIDの構造を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

以下、本発明の好ましい実施形態について添付図面を参照しながら説明する。

【0028】

[1. 超伝導パイ接合構造]

[1.1 接合構造体の概要]

図1(a)は、実施形態に係る超伝導パイ接合構造1を示している。この接合構造1は、スピン三重項超伝導体となる物質によって形成された基板2の表面2aに、真空熱蒸着法などによりスピン一重項超伝導体となる物質の層(厚膜:蒸着膜)3a, 3bを形成し、当該層3a, 3bを集束イオンビーム法(FIB)によって所望の形状に微細加工して得たものである。このため、この接合構造1は、製作が容易であって、しかも比較的強固な基板2上に膜3a, 3bを形成しているため全体として強固な構造となっている。

【0029】

[1.2 スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体]

スピン一重項とは、2個の電子によって形成されるクーパ対の合成スピンのS=0であるものをいい、スピン三重項とは、クーパ対の合成スピンのS=1であるものをいう。これまでに知られているほとんどの超伝導体は、スピン一重項超伝導体である。

【0030】

ここで、電子はフェミル粒子であるため、状態ベクトル(軌道部分とスピン部分の積で表される)全体としては、反対称となる。

スピン一重項超伝導体では、スピン部分が反対称であるため、軌道部分の波動関数は対称となり、波動関数の空間対称性(偶パリティ)という性質を有している。

一方、スピン三重項超伝導体では、スピン部分が対称となるため、軌道部分の波動関数は反対称となる。つまり、スピン三重項超伝導体では、内因的に、波動関数の空間反対称性(奇パリティ)という性質を有している。

【0031】

スピン三重項超伝導体としては、ストロンチウムとルテニウムの酸化物である Sr_2RuO_4 (「ルテニウム酸化物」)がある。なお、 Sr_2RuO_4 は、p波超伝導体である。この Sr_2RuO_4 が、超伝導体であることは、本発明者の前野らによって発見された。

【0032】

以下では、スピン三重項超伝導体として Sr_2RuO_4 を採用し、スピン一重項超伝導体としてPbを採用した場合について説明する。 Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c は約1.5Kであり、Pbの転移温度は、約7.2Kである。つまり、 $T_c(Sr_2RuO_4) < T_c(Pb)$ である。

なお、スピン三重項超伝導体である他の物質としては、現在のところ、 UPt_3 や Li_2Pt_3B が有力視されている。また、スピン一重項超伝導体としては、数多くのものが存在するため、特に、Pbに限定されるものではなく、例えば、Nbを採用してもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 3 】

[1 . 3 Sr_2RuO_4 基板]

本実施形態では、スピン三重項超伝導体からなる基板 2 として、 Sr_2RuO_4 の単結晶を用いた。スピン三重項超伝導体は、結晶の乱れを嫌うため、スピン三重項超伝導体は単結晶とするのが好適である。 Sr_2RuO_4 の純良単結晶の育成は、例えば、フローティング・ゾーン法によって行うことができる。

【 0 0 3 4 】

本実施形態においては、スピン三重項超伝導体によって基板 2 を構成したため、(スピン三重項超伝導体以外の物質によって形成された) 基板上に、スピン三重項超伝導体の膜(層)を形成するという工程を行う必要がない。

スピン三重項超伝導体の単結晶バルクを育成するのに比べ、スピン三重項超伝導体の単結晶の膜を形成するのは困難である。このため、接合用のスピン三重項超伝導体の形成のために、薄膜形成技術を利用しようとする、製作が困難になる。

これに対し、本実施形態では、スピン三重項超伝導体を基板 2 として利用するものであるため、フローティング・ゾーン法などによって育成したスピン三重項超伝導体の結晶バルクを、切削加工等によって、基板 2 としての所望形状(例えば、板状)に加工すれば良い。したがって、製作が比較的容易である。

【 0 0 3 5 】

[1 . 3 . 1 Sr_2RuO_4 の結晶構造]

スピン三重項超伝導体となる Sr_2RuO_4 (層状ルテニウム酸化物) の結晶構造は、図 2 に示すように、層状ペロブスカイト構造であり、 RuO_2 面 1 0 が積層している。

以下では、図 2 の結晶構造において、 RuO_2 面 1 0 に平行であって互いに直交する 2 方向を、それぞれ、a 方向及び b 方向と呼び、 RuO_2 面 1 0 に平行な面を「a b 面」と呼ぶこととする。また、a b 面 1 0 に垂直な方向を c 方向と呼び、b 方向に垂直な面を a c 面と呼び、a 方向に垂直な面を b c 面と呼ぶこととする。

層状構造を反映して前記 a b 面方向には導電性が良い。しかしながら結晶表面での原子配列を反映して、結晶表面への接触抵抗の点からは、前記 a b 面 (RuO_2 面に平行な面) は、導電性が比較的悪く、前記 a c 面及び前記 b c 面は、導電性が比較的良好である。

【 0 0 3 6 】

[1 . 3 . 2 Sr_2RuO_4 - Ru 共晶系]

また、本実施形態では、基板 2 の材料として、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶 (Sr_2RuO_4 - Ru 共晶系) を用いる。 Sr_2RuO_4 - Ru 共晶系は、 Sr_2RuO_4 の結晶バルク育成のために、高温で溶融した液体の Sr_2RuO_4 を冷却する際に、常伝導体(常伝導金属)である Ru が析出し、単結晶 Sr_2RuO_4 に規則的に薄片状の Ru が埋め込まれた状態となったものである。

図 3 は、 Sr_2RuO_4 - Ru 共晶系の表面の光学顕微鏡写真であり、白色線状の明るい領域が Ru を示し、灰色の暗い領域が Sr_2RuO_4 である。

【 0 0 3 7 】

[1 . 4 [スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] の接合(近接接合)]

図 1 (a) のパイ接合構造では、基板 2 表面上に形成された層 3 a , 3 b は、互いに離間する第 1 領域 3 a 及び第 2 領域 3 b を有している。これにより、[第 1 領域 3 a / 基板 2 / 第 2 領域 3 b] の接合が、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] の接合となっている。

【 0 0 3 8 】

さて、 Sr_2RuO_4 のバルクを基板 2 に加工する際に、前記 b c 面や前記 a c 面は、結晶表面で比較的導電性が良いため、前記 b c 面又は前記 a c 面が、基板 2 において層 3 a , 3 b などが形成される形成面 2 a となるように加工すると、P b と Sr_2RuO_4 との接合が確実に得られて有利である。

一方、前記 a b 面が、基板 2 において層 3 a , 3 b などが形成される形成面 2 a となる

10

20

30

40

50

ように加工するのが、基板2の加工容易性上、有利である。しかし、前記ab面は結晶の表面では導電性が悪いため、ab面表面からなる形成面2a上に層3a, 3bを形成すると、両者の確実な接合を得ることは困難である。

【0039】

そこで、本実施形態では、図1(a)に示すように、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面に析出したRu(常伝導体)4a, 4bを、Pbと Sr_2RuO_4 との接合に利用する。

Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面に析出した多数のRuのうち、選択した一对の離間したRuを、層3a, 3bとの接合用とし、このRuを介して、Pbと Sr_2RuO_4 とが確実に接合されている。

このように、図1(a)では、Ru(常伝導体)を含む共晶系を利用することにより、[Pb/Ru- Sr_2RuO_4 -Ru/Pb]の接合構造となっており、換言すると、[スピンー重項超伝導体/常伝導体-スピン三重項超伝導体-常伝導体/スピンー重項超伝導体]の接合構造となっている。

【0040】

[1.5 [Pb/Ru- Sr_2RuO_4 -Ru/Pb]接合構造の製法]

図1(a)に示す接合構造を製作するには、まず、図1(b1)に示すように、基板2となる Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面2aに析出したRuのうち、一对の離間したRu4a, 4bを、第1及び第2接合用常伝導体として選択する(選択工程)。Ru4a, 4bの対間隔は、10 μ m程度又はそれ以下が好ましい。

【0041】

続いて、図1(b2)に示すように、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面2aに対し、選択したRu4a, 4bを判別するための目印、又は後のPb除去工程におけるPb除去範囲を示すための目印、となる凹部6, 6を形成する(目印形成工程)。凹部6の形成は、集束イオンビーム法(FIB)によって行う。これらの凹部6, 6の位置は、選択したRu4a, 4bを判別できる位置又は後のPb除去工程におけるPb除去範囲を示すことができる位置であれば特に限定されないが、図1(b2)に示すような位置が好ましい。

【0042】

さらに、図1(b3)に示すように、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶系の表面2aに、選択したRu4a, 4bを覆うPb厚膜を蒸着法によって形成する(Pb(スピンー重項超伝導体)膜形成工程)。このPb厚膜の厚さは、1 μ m程度又はそれ以下が好ましい。

【0043】

そして、図1(b4)に示すように、凹部6, 6を目印として、所定範囲のPb膜を、FIBによって除去する(Pb(スピンー重項超伝導体)除去工程)。

この除去工程では、前記凹部6, 6を目印として、Pb膜を、第1接合用常伝導体(第1Ru)4a側の第1領域3aと、第2接合用常伝導体(第2Ru)4b側の第2領域3bとに区分けするための離間部7が、第1接合用常伝導体4aと第2接合用常伝導体4bとの間の位置(対間隙)に形成される。また、Pb膜のうち、その他の不要な領域も除去される。離間部7の幅(第1領域3aと第2領域3bとのギャップ)は、数 μ m程度(例えば2 μ m程度)又はそれ以下が好ましく、更には、0.5 μ m程度又はそれ以下が好ましい。

【0044】

[2. Pb/ Sr_2RuO_4 /Pb接合構造の特性]

上述のようにして得られた接合構造において、図1(b4)に示すように、Pb膜からなる層の第1領域3a及び第2領域3bそれぞれに電流を測定するための電極と、電圧を測定するための電極とを取り付けて測定を行った結果を、図4に示す。

【0045】

図4は、Pb/ Sr_2RuO_4 /Pb接合の臨界電流 I_c -温度T特性を示している。図4の I_c -T特性に示すように、 Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c より高い範囲で、温度Tを低下させていくと、臨界電流 I_c は増大していくが、温度Tが Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c になって、 Sr_2RuO_4 が超伝導転移すると、臨界電流 I_c が一旦低下する。さらに温

10

20

30

40

50

度 T を低下させると、臨界電流 I_c は再び上昇する。

【0046】

Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c 付近で臨界電流 I_c が抑制されるのは、 Pb からの近接効果によって誘起されたスピン-三重項超伝導（ s 波超伝導）と、 Sr_2RuO_4 結晶のスピン三重項超伝導（ p 波超伝導）との競合のためと考えられる（C. Honerkamp and M. Sigrist, "The Competition between the 0- and π -Phase Shift in the Pb - Sr_2RuO_4 - Pb Junction", Progress of Theoretical Physics, Vol. 100, No. 1, pp. 53-61, July 1998 参照）。

図4に示すような特異な I_c の温度依存性 $I_c(T)$ は、 Sr_2RuO_4 がスピン三重項超伝導体（奇パリティ）であることを示している。仮に、 Sr_2RuO_4 が Pb と同じスピン三重項超伝導体（偶パリティ）であるとする、 Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c の前後の範囲において温度 T が低下すると、臨界電流 I_c は漸次増加するはずだからである。

【0047】

さらに、図4に示す I_c の温度依存性 $I_c(T)$ は、図5に示すように、 $Pb/Sr_2RuO_4/Pb$ 接合が、温度 $T < T_c(Sr_2RuO_4) = 1.5 K$ において、超伝導位相差がゼロであるゼロ接合（図5（b）（d）参照）から、超伝導位相差が π であるパイ接合の混じった中間位相状態（図5（b）（c）参照）にスイッチングしたことを意味する。

つまり、 $Pb/Sr_2RuO_4/Pb$ 接合は、 Sr_2RuO_4 の転移温度 T_c より十分低い温度範囲において、超伝導パイ接合となっている。

【0048】

[3. パイ接合 SQUID]

図6は、上述の超伝導パイ接合（ $Pb/Sr_2RuO_4/Pb$ 接合）1を有する超伝導ループ（SQUID）11を示している。この超伝導ループ11は、ギャップを有するループ本体をスピン-三重項超伝導体（ Pb ）にて形成し、ループ本体のギャップに、スピン三重項超伝導体（ Sr_2RuO_4 ）を設けた接合部1を有している。この接合部1は、パイ接合であるから、この超伝導ループ11は、パイ接合 SQUID となっている。なお、前記超伝導ループにおいて、スピン-三重項超伝導体とスピン三重項超伝導体とは、それぞれ、2本ずつの電極13, 14が接続される。

【0049】

この超伝導ループ（パイ接合 SQUID）11では、ループ内部中空部が、磁束透過用の磁束透過部12となっている。パイ接合 SQUID 11では、磁束透過部12において、プラスまたはマイナスの半磁束量子 $\phi_0/2$ が、自発的に発生する（半磁束量子の閉じ込め）。この超伝導ループ11は、そのインダクタンスを L とすると、 $L \cdot I_c > \phi_0/2$ となるように形成されている。

【0050】

このように、本実施形態では、スピン三重項超伝導体の特質を利用し、スピン-三重項超伝導体と組み合わせることで、新奇な原理によるパイ接合 SQUID が構成されている。このパイ接合 SQUID は、精密磁化測定装置、脳磁計、地震計、量子ビット（SQUID 量子ビット）などに用いることができる。

【0051】

[3.1 パイ接合 SQUID の製法の第1例]

図7～図11は、前述のパイ接合 SQUID の製法の第1例を示している。この製法は、前述の $[Pb/Ru-Sr_2RuO_4-Ru/Pb]$ 接合構造の製法を応用したものであり、パイ接合 SQUID の製法に関して特に説明しない点については、先に説明した $[Pb/Ru-Sr_2RuO_4-Ru/Pb]$ 接合構造の製法についての説明事項が援用される。

【0052】

図7は、基板2形成のための前処理工程を示している。まず、フローティング・ゾーン法などによって育成した Sr_2RuO_4-Ru 共晶系の結晶バルクを、切削加工等によって、基板2としての所望形状（例えば、板状体20）に加工する（図7（a））。そして、

この板状体 20 を、所定の切断線に沿って、切断し、複数 (2 つ) の基板分割片 21, 21 を得る (図 7 (b))。

さらに、基板分割片 21, 21 の切断面 21a に銀ペーストやアルミナ接着剤などの接着材料 22 を塗布し、熱処理を行って、両基板分割片 21, 21 を接着して、基板 2 を構成する。超伝導体自体は磁束が透過しにくい、超伝導体ではない接着材料の部分は、磁束が容易に透過する。これにより、基板 2 を超伝導体で形成しつつも、接着材料 22 の部分において磁束が透過する基板 2 が得られる。なお、接着材料 22 の部分が、平坦になるように、接着した後、基板 2 の表面を研磨するのが好ましい。

【0053】

次に、図 8 に示すように、基板 2 の表面 (ab 面) 2a に析出した多数の Ru4 の中から、1 対の接合用の Ru (接合用常伝導体) 4a, 4b を選択する (選択工程)。なお、図 8 に示す選択工程は、図 7 に示す前処理工程より先に行っても良い。

10

【0054】

続いて、図 9 に示すように、基板 2 の表面 2a に、 Al_2O_3 などの絶縁材料からなる絶縁膜 5 を形成する (絶縁膜形成工程)。絶縁膜 5 は、基板 2 の表面 2a の所定範囲 (全範囲であってもよい) に形成され、選択した接合用の Ru4a, 4b を露出させるための開口部 5a を有している。この絶縁膜 5 は、所定のマスクパターンを用いた露光装置 (Lithography) によって形成される。

【0055】

絶縁膜 5 が形成された範囲においては、選択した接合用の Ru4a, 4b 以外の Ru4 が絶縁膜 5 によって覆われており、この絶縁膜 5 が形成された範囲において、当該絶縁膜 5 の上に形成されるスピンー重項超伝導体が基板 2 と接合するのを阻止している。

20

なお、絶縁膜 5 が形成される範囲は、接着材料部分 22 も覆う範囲として設定されている。

【0056】

さらに、図 10 に示すように、絶縁膜 5 上に、スピンー重項超伝導体となる物質である Pb (又は Nb) の蒸着厚膜 3 が形成される。この Pb 膜 3 は、絶縁膜 5 の開口部 5a 内にも形成されるため、選択された接合用の Ru4a, 4b 上に、直接、Pb 膜 3 が形成されることになる。なお、Pb 膜 3 が形成される範囲は、接着材料部分 22 と重なるように設定される。

30

【0057】

最後に、図 11 に示すように、FIB によって、Pb 膜 3 (及び絶縁膜 5) の一部を除去することにより、Pb 膜 3 を所定の形状に加工する。

図 11 の加工工程では、Pb 膜 3 を、外側のループ部 (ループ層) 31 と内側部 32 とに区分けするとともに、ループ部 (ループ層) 31 中に、その一部が欠如したギャップ (離間部) 33 を形成するための溝 35 を、FIB によって形成することで行われる。

ギャップ (離間部) 33 は、選択した 1 対の Ru4a, 4b の間の位置において、ループ部 31 を、その径内外方向に切断するように形成されたものである。

【0058】

なお、基板 2 に凹部 6 を形成しておき、その凹部 6 を目印に Pb 膜の加工をおこなってもよい。また、Pb 膜の内側部 32 を残す必要はなく、内側部 32 に相当する範囲の Pb 膜 3 を除去してもよい。

40

【0059】

以上により、ループ部 (ループ層) 31 は、絶縁膜 5 の上に形成されているために基板 2 に対して実質的に接合されていないループ本体領域 31c と、前記開口部 5a 内の位置において基板 2 に対して接合している接合用領域 31a, 31b と、を備えることになる。

また、接合用領域 31a, 31b は、ギャップ (離間部) 33 の存在により、接合用の第 1 の Ru4a に接合する第 1 接合用領域 31a と、接合用の第 2 の Ru4b に接合する第 2 接合領域 31b とに区分けされる。

50

【 0 0 6 0 】

このようにして得られた [第 1 接合用領域 3 1 a / 基板 2 / 第 2 接合用領域 3 1 b] の接合は、前述の超伝導パイ接合構造と同様に、 [スピナー重項超伝導体 (P b) / スピン三重項超伝導体 (Sr_2RuO_4) / スピナー重項超伝導体 (P b)] のパイ接合となっている。ループ本体領域 3 1 c のギャップ部 3 3 に、このパイ接合が形成されることで、超伝導ループ 1 1 からなるパイ接合 S Q U I D が構成される。

【 0 0 6 1 】

また、F I B によって形成される溝 3 5 は、接着材料 2 2 上に位置するように形成される。したがって、接着材料 2 2 の位置が磁束透過部 1 2 となり、パイ S Q U I D において自発的に発生する半磁束量子 $\phi_0 / 2$ が、ループ層 3 の内側において基板 2 を透過することができる。

10

【 0 0 6 2 】

また、図 6 の電極 1 3 , 1 4 に対応して、図 1 1 に示すように、基板 2 の側面に電極 1 3 , 1 3、ループ本体領域 3 1 c に電極 1 4 , 1 4 が接続される。基板 2 の側面は、導電性の良い前記 a c 面又は前記 b c 面となるため、R u を利用する必要がなく、電極 1 3 , 1 3 の接続が容易である。

【 0 0 6 3 】

[3 . 2 パイ接合 S Q U I D の製法の第 2 例]

図 1 2 ~ 図 1 4 は、パイ接合 S Q U I D の製法の第 2 例を示している。第 2 例に係る製法においても、第 1 例に係る製法と同様に、前処理工程 (図 7 参照) 及び選択工程 (図 8 参照) が行われる。

20

そして、図 1 2 に示すように絶縁膜形成工程が行われた後、図 1 3 に示すように P b 膜の形成工程が行われる。なお、図 1 2 及び図 1 3 に示す工程は、第 1 例に係る図 9 及び図 1 0 に示す工程と実質的に同一のものであり、相違するのは形成される膜 3 , 5 の形状だけである。

【 0 0 6 4 】

P b 膜を形成した後、図 1 4 に示すように、F I B によって、P b 膜 3 (及び絶縁膜 5) の一部を除去することにより、P b 膜 3 を所定の形状に加工する加工工程が行われる。

図 1 4 の加工工程では、P b 膜 3 を、外側部 3 0 及び内側部 3 2 と、外側部 3 0 及び内側部 3 2 の間にあるループ部 (ループ層) 3 1 とに区分けするとともに、ループ部 (ループ層) 3 1 中に、その一部が欠如したギャップ (離間部) 3 3 を形成するための溝 3 5 を、F I B によって形成することで行われる。

30

第 2 例に係る加工工程 (図 1 4) では、第 1 例に係る加工工程 (図 1 1) とは異なり、P b 膜 3 に外側部 3 0 が形成される。

【 0 0 6 5 】

第 2 例に係る加工工程のように加工を行うことで、一つの P b 膜内に複数のループ部 3 1 を形成することが可能であり、したがって、一つの基板 2 上に複数のパイ接合 S Q U I D を形成することができる。

【 0 0 6 6 】

第 2 例に係る加工工程によって形成されたループ部 (ループ層) 3 1 も、第 1 例に係る加工工程によって形成されたループ部 (ループ層) 3 1 と同様のものであり、パイ接合を有する超伝導ループ 1 1 からなるパイ接合 S Q U I D が構成される。

40

【 0 0 6 7 】

[3 . 3 パイ接合 S Q U I D の製法の第 3 例]

図 1 5 は、 Sr_2RuO_4 - R u 共晶の表面に析出した R u (常伝導体) 4 a , 4 b を、P b と Sr_2RuO_4 との接合に利用する接合構造の他の例を示している。図 1 5 に示す接合構造も、 [スピナー重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピナー重項超伝導体] の接合となっている。

【 0 0 6 8 】

図 1 に示す接合構造では、前述のように、基板 2 表面上に形成された層 (P b) 3 a , 3

50

bにおいて互いに離間する第1領域3a及び第2領域3bは、それぞれ、異なるRu(常伝導体)4a, 4bを介して、 Sr_2RuO_4 と接合されている。

これに対し、図15に示す接合構造では、第1領域3a及び第2領域3bは、いずれも個別のRu(常伝導体)4cを介して、 Sr_2RuO_4 と接合されている。つまり、図15に示す接合用常伝導体(Ru)4cは、互いに離間した第1領域3a及び第2領域3bを架け渡すように配置されている。なお、第1領域3aと第2領域3bとのギャップは、数 μm 程度(例えば2 μm 程度)又はそれ以下が好ましく、更には、0.5 μm 程度又はそれ以下が好ましい。

【0069】

図15に示すように共通の接合用常伝導体(Ru)4cを介して第1領域3aと第2領域3bを Sr_2RuO_4 と接合した場合でも、図1の接合構造における接合特性(図4参照)と同様の振る舞いを示すことが実験的に確認された。

つまり、[Pb/ Sr_2RuO_4 /Pb]接合の接合特性は、Pb-Pb(第1領域3a-第2領域3b)間のRuの配置によらず、同様の振る舞いを生じることができる。

【0070】

図16及び図17は、図15に示す接合構造を利用するパイ接合SQUIDの製法(第3例)を示している。第3例に係る製法においても、前処理工程、選択工程、絶縁膜形成工程、及び、スピナー重項超伝導体膜形成工程(Pb膜の形成工程及びPb膜の加工工程)が行われる。

【0071】

第3例に係る製法における前処理工程は、第1例に係る製法における前処理工程と実質的に同じである。

【0072】

第3例に係る製法における選択工程では、基板2の表面(ab面)2aに析出した多数のRu4の中から、1以上の接合用のRu(接合用常伝導体)4cが選択される。なお、以下では、1個のパイ接合SQUIDについて接合用Ruを1個だけ選択した場合について説明するが、1個のパイ接合SQUIDについて接合用Ruを複数選択してもよい。

また、同一の基板2上に、複数のパイ接合SQUIDを形成する場合には、複数のパイ接合SQUIDそれぞれに用いられる接合用Ruを個別に選択すればよい。

【0073】

第3例に係る製法における絶縁膜形成工程は、第1例に係る製法における同工程とほぼ同様である。ここでは、絶縁膜5に形成される開口部5aは、選択された単一のRu4cを露出させるためのものとなる。

【0074】

続いて行われるPb膜形成工程も第1例と同様である。Pb膜形成工程の後に行われるPb膜加工工程では、Pb膜3を、外側のループ部(ループ層)31と内側部32とに区分けするとともに、ループ部(ループ層)31中に、その一部が欠如したギャップ(離間部)33を形成するための溝35を、FIBによって形成することで行われる。

第3例では、図16に示すように、ギャップ(離間部)33は、選択したRu4cの長手方向ほぼ中央位置を横断するように形成される。なお、図16では、理解の容易のため、絶縁膜5の図示を省略している。

【0075】

ループ部31は、ギャップ(離間部)33の存在により、接合用Ru4cの長手方向一端側に接合する第1接合領域31aと、当該接合用Ru4cの長手方向他端に接合する第2接合領域31bとに区分けされる。つまり、接合用Ru4cは、第1接合領域31aと第2接合領域31bとを架け渡すように位置している。

【0076】

[4. 変形例]

上記において開示した事項は、例示であって、本発明を限定するものではなく、様々な変形が可能である。

10

20

30

40

50

例えば、 Sr_2RuO_4 における前記bc面や前記ac面を、Pb膜との接合に用いても良い。前記bc面や前記ac面は、結晶表面の導電性が比較的良いため、前記bc面や前記ac面をPb膜との接合に用いた場合には、析出Ruを接合に利用する必要がなくなり、製造が容易となる。

【0077】

図7において、磁束透過部12を形成するために、板状体20を切断した後、接着する例を示したが、板状体20を切断せずにアルミナ硬化剤などの磁束が容易に透過する材料に埋め込んで固めた後、表面研磨した物を、基板2として用いてもよい。つまり、前処理工程2において、基板の切断・接着を行うのに代えて、板状体20の周囲に磁束が容易に透過する材料40を形成し、その材料40の部分を磁束透過部12としてもよい。

10

【0078】

具体的には、まず、ペースト状のアルミナ硬化剤を、図示しないモールドに流し込むとともに、アルミナ硬化剤中に、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶からなる板状体20を埋め込む。そして、アルミナ硬化剤を加熱によって硬化させる。これにより、図18(a)に示すように、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶からなる板状体(基板本体)20の周囲に、アルミナ硬化剤からなる外側部材40が一体的に形成された基板2を得る。

なお、板状体20は、その表面(ab面)20aが、外側部材40の表面40aと面一となり、その側面の一つ20b(bc面又はac面)が、外側部材40の側面40bと面一となるように配置される。

基板2のうち、少なくとも、板状体表面20a及び外側部材表面40aからなる面、及び板状体側面20b及び外側部材側面40bからなる面には、研磨が施される。

20

【0079】

そして、図18(b)に示すように、基板2の表面20a, 40aに、開口部5aを有する絶縁膜5を形成する。この絶縁膜5は、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶からなる板状体20表面20aのほぼ全体と、外側部材表面40aの一部とを覆うように形成される。ただし、一对の接合用のRu4a, 4bは、開口部5aによって露出する。

【0080】

さらに、図18(b)に示すように、絶縁膜5上に、スピン三重項超伝導体となる物質であるPb(又はNb)の蒸着厚膜が形成され、FIBによって、Pb膜からなるループ部(ループ層)31を形成する。

30

このループ部31のループ内側領域の一部が、外側部材40上に位置する。この外側部材40上に位置するループ内側領域では、基板2の厚さ方向にみて超伝導体が存在せず、磁束透過部12となる。

また、図6の電極13, 14に対応して、板状体20の側面20bに電極13, 13が接続され、ループ部31のループ本体領域31cに電極14, 14が接続される。

【0081】

また、磁束透過部12の他の例としては、 Sr_2RuO_4 -Ru共晶からなる基板2を貫通する孔を形成し、その孔の部分を磁束透過部12としたものでもよい。つまり、前処理工程2において、基板の切断・接着を行うのに代えて、基板2において磁束透過部12としたい位置に孔を形成すればよい。

40

【符号の説明】

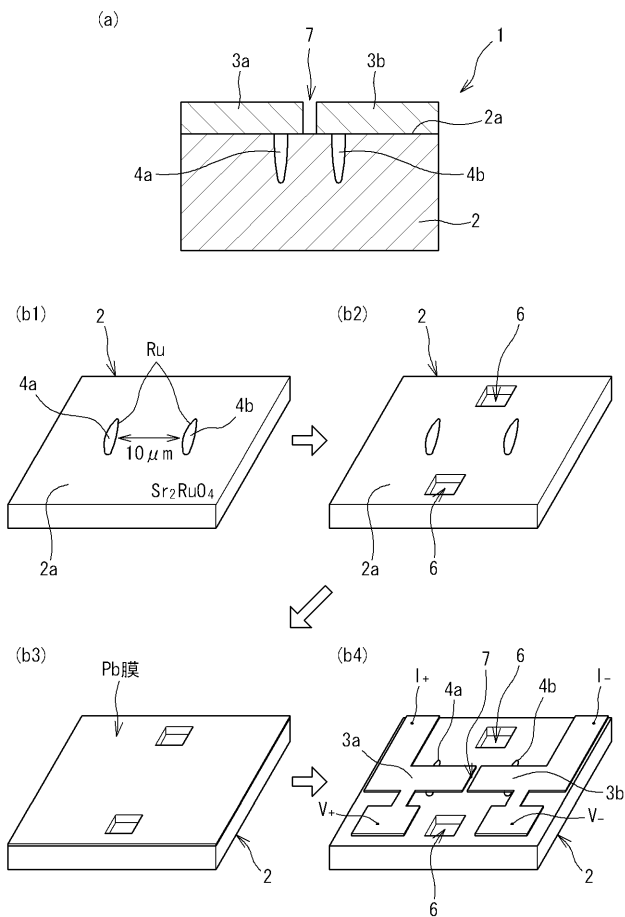
【0082】

- 1 超伝導パイ接合構造
- 2 基板(スピン三重項超伝導体)
- 4a 第1接合用常伝導体(析出常伝導体)
- 4b 第2接合用常伝導体(析出常伝導体)
- 4c 接合用常伝導体(析出常伝導体)
- 5 絶縁膜
- 5a 開口部
- 11 超伝導ループ

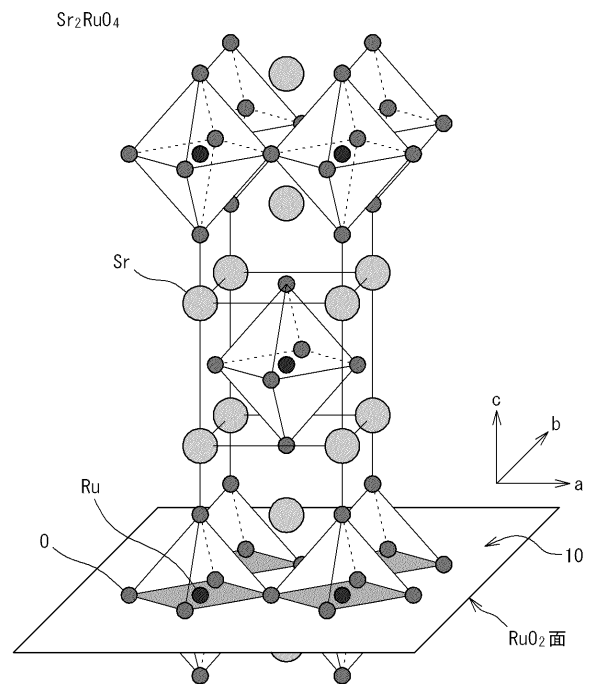
50

- 1 2 磁束透過部
- 2 0 板状体 (基板本体)
- 2 1 基板分割片
- 2 2 接着材料
- 3 1 ループ部 (ループ層)
- 3 1 a 第1 接合用領域
- 3 1 b 第2 接合用領域
- 4 0 外側部材 (磁束が容易に透過する材料)

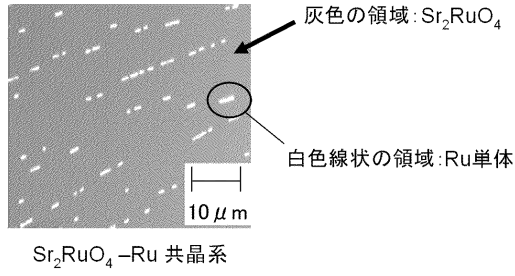
【 図 1 】



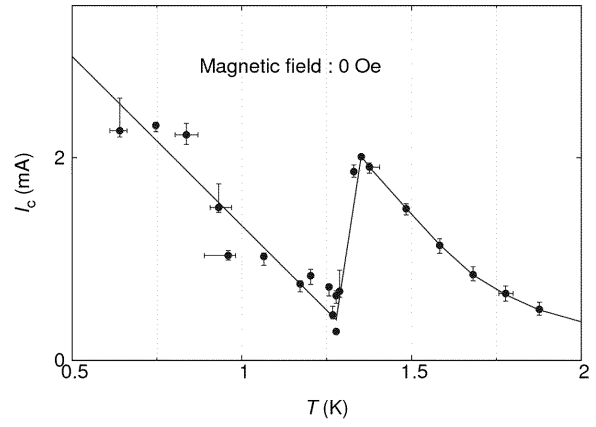
【 図 2 】



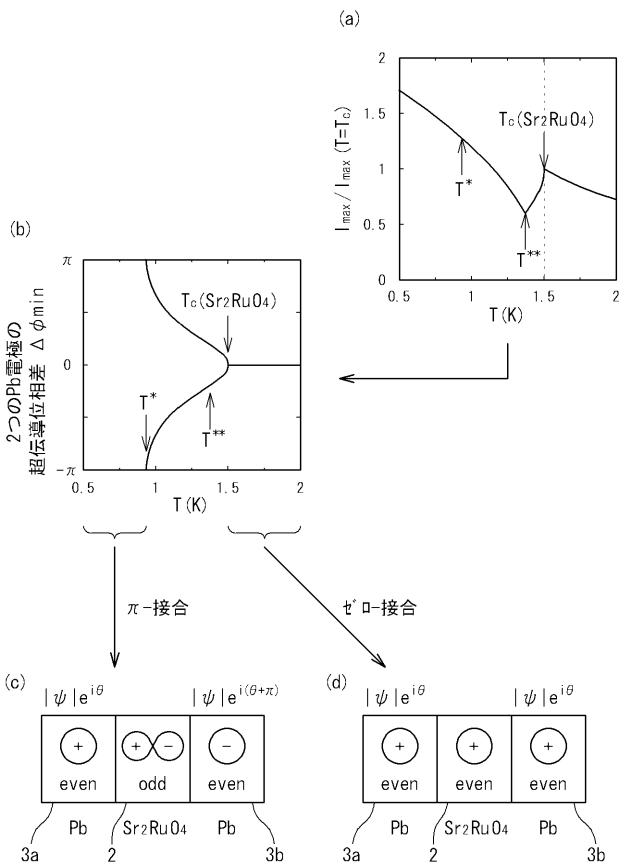
【 図 3 】



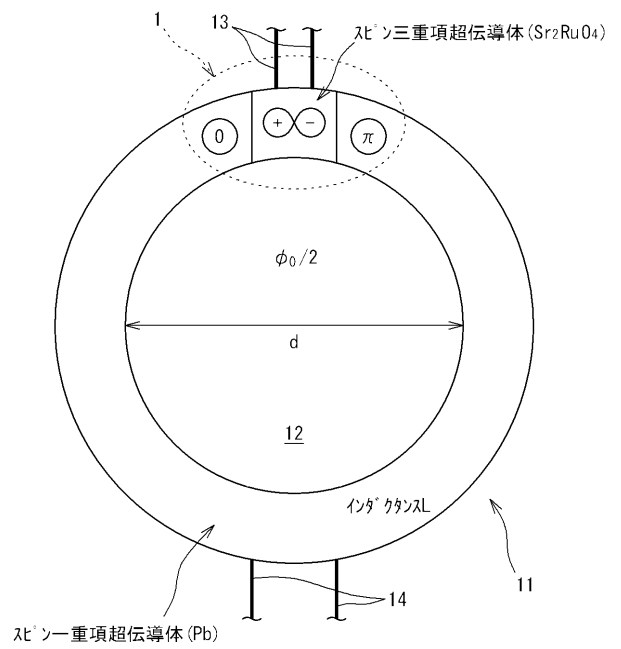
【 図 4 】



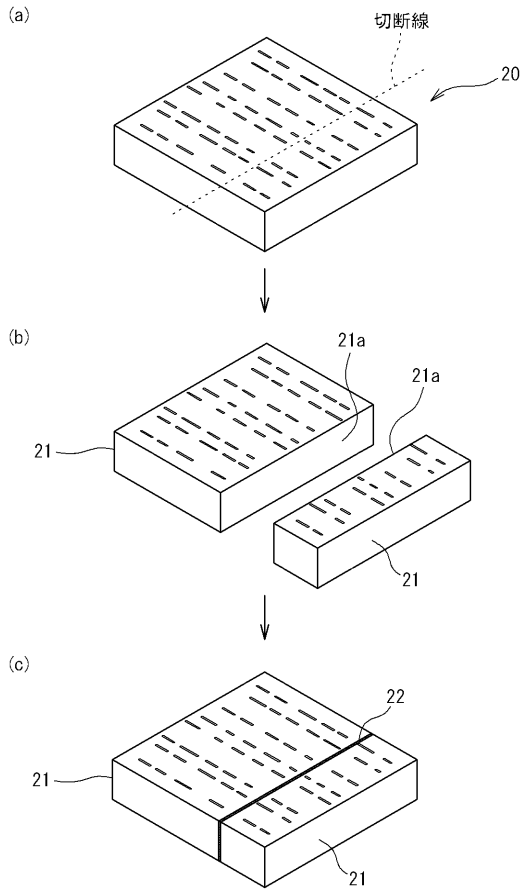
【 図 5 】



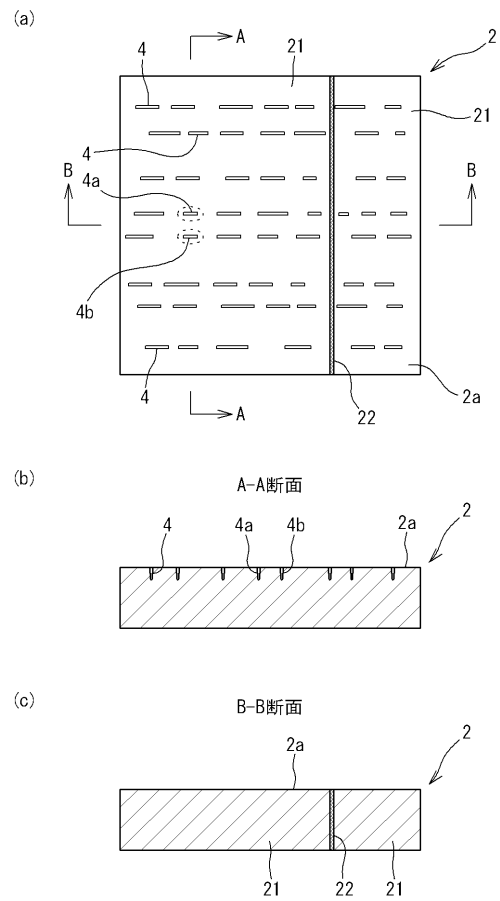
【 図 6 】



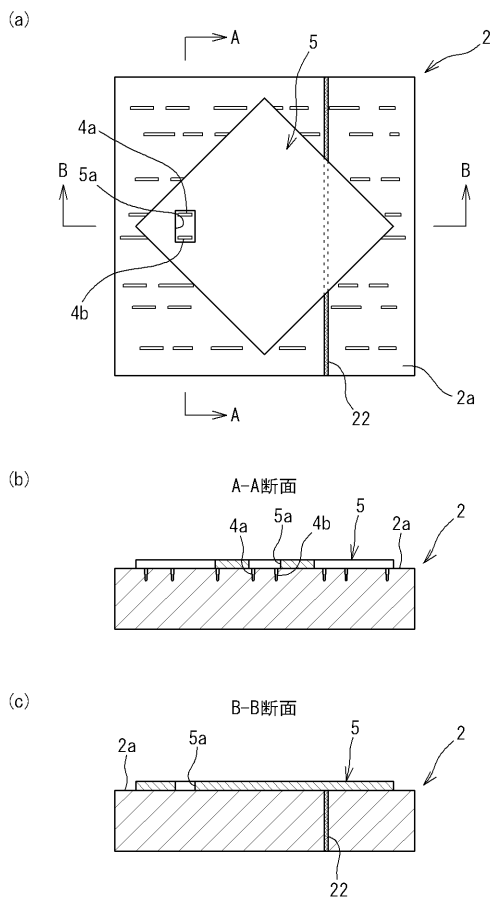
【 図 7 】



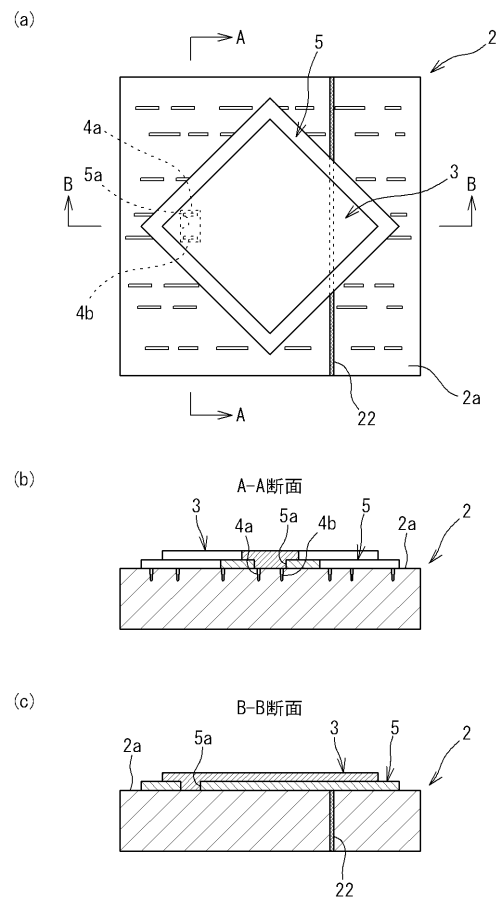
【 図 8 】



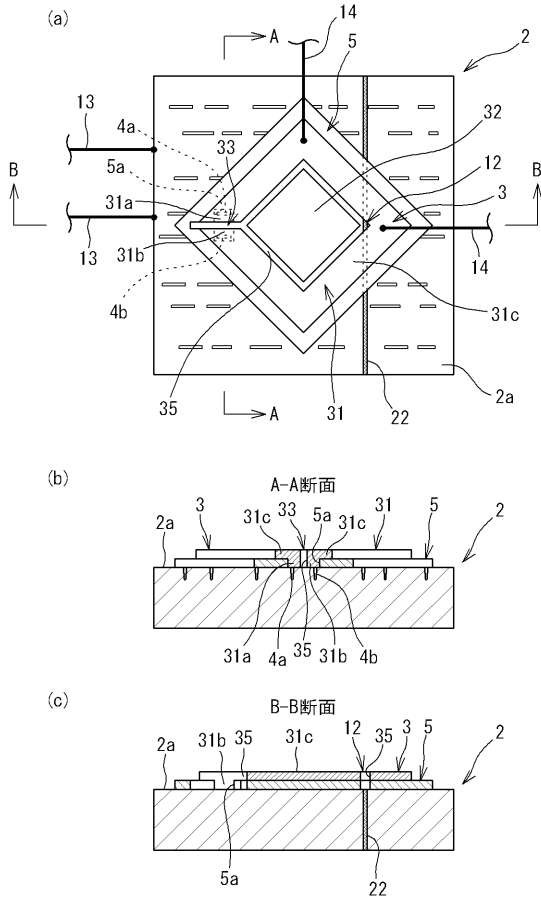
【 図 9 】



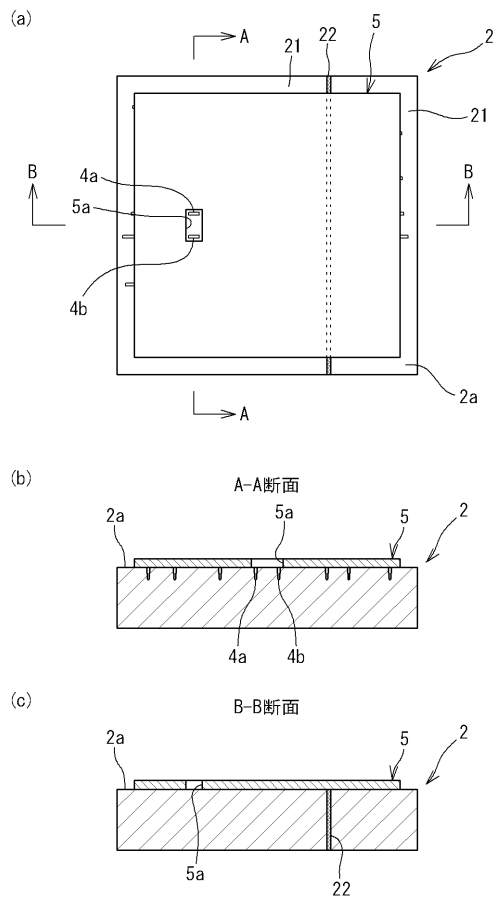
【 図 10 】



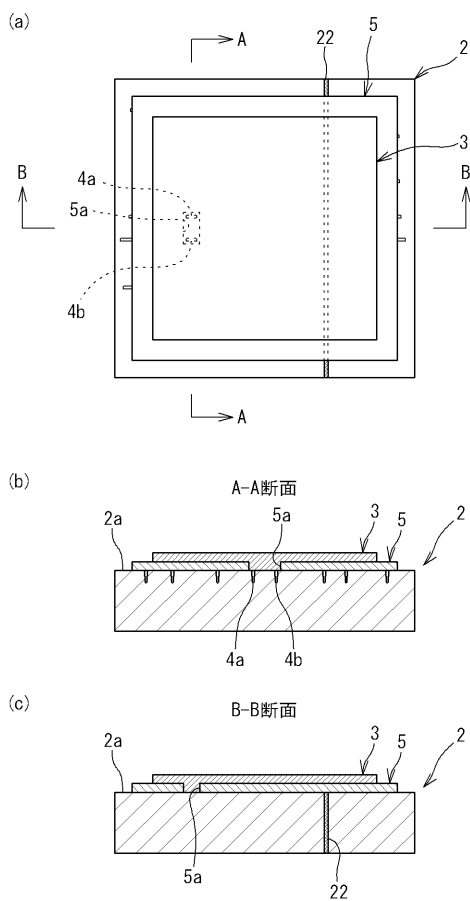
【 図 1 1 】



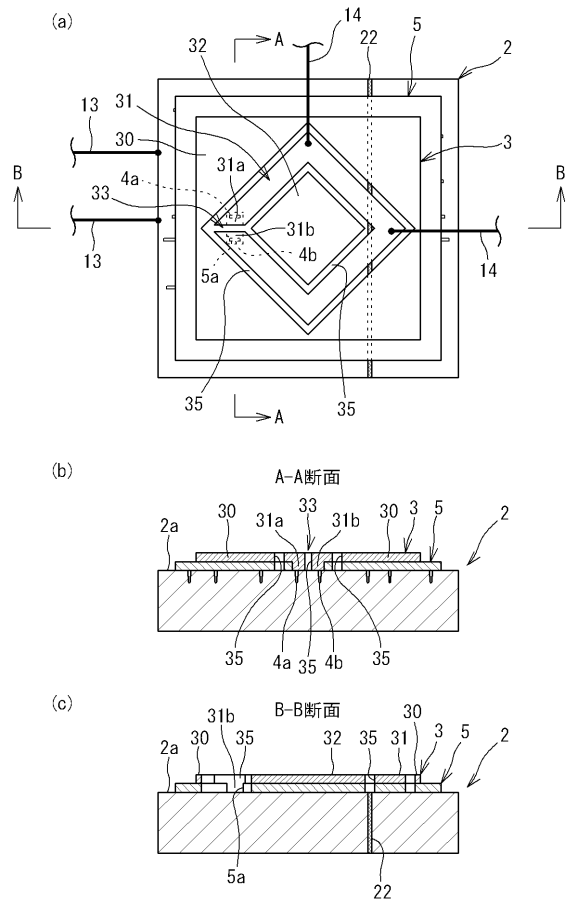
【 図 1 2 】



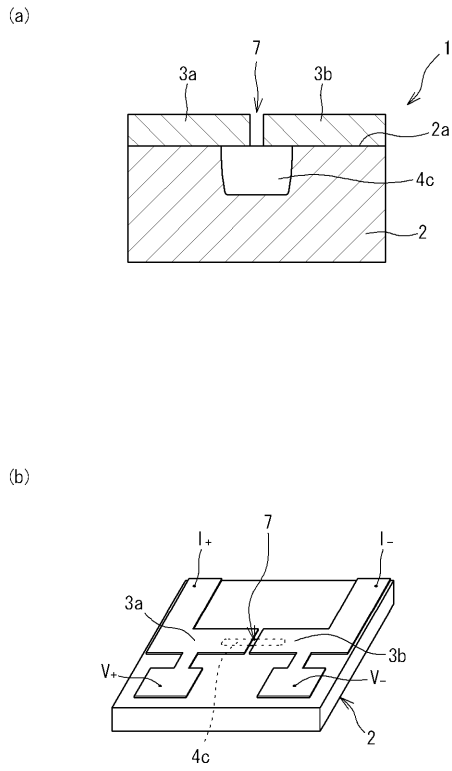
【 図 1 3 】



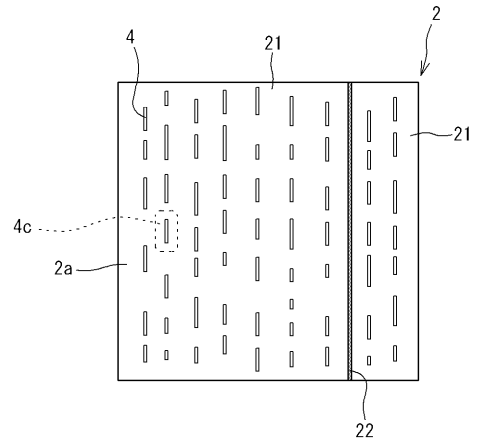
【 図 1 4 】



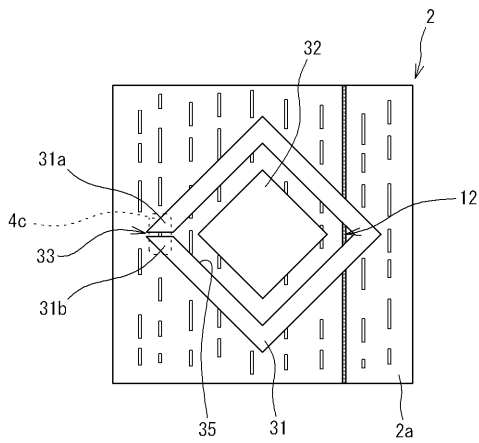
【 図 1 5 】



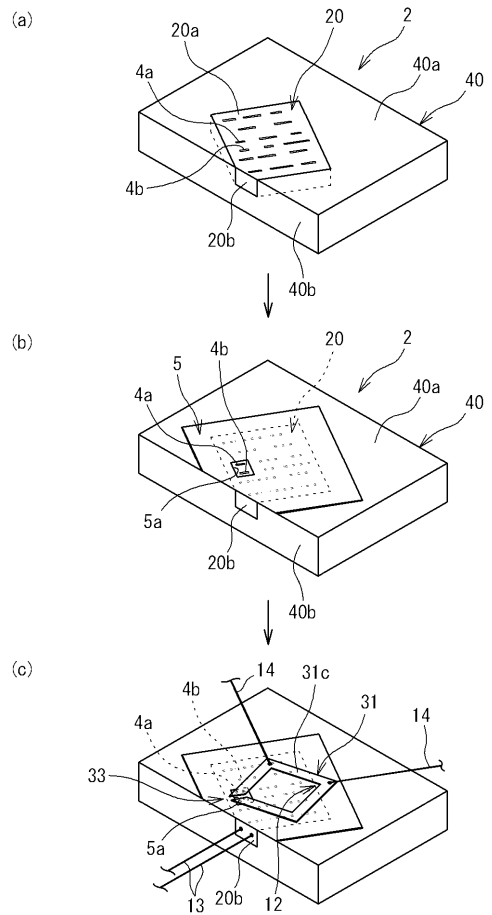
【 図 1 6 】



【 図 1 7 】



【 図 1 8 】



【手続補正書】

【提出日】平成23年2月24日(2011.2.24)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

(削除)

【請求項2】

スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板と、当該基板の表面に形成されたスピン一重項超伝導体のループ層と、を有し、前記ループ層は、前記基板に対して実質的に接合されていないループ本体領域と、前記基板に対して接合するための第1接合用領域及び第2接合用領域と、を備え、前記第1接合用領域及び第2接合用領域それぞれが前記基板と接合することで、[スピン一重項超伝導体/スピン三重項超伝導体/スピン一重項超伝導体]のパイ接合を有する超伝導ループが形成されている

パイ接合SQUID。

【請求項3】

前記基板は、スピン三重項超伝導体と常伝導体との共晶によって形成され、スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体との接合に、前記基板が有する前記常伝導体の導電性を利用した

請求項2記載のパイ接合SQUID。

【請求項4】

前記スピン三重項超伝導体は、 Sr_2RuO_4 である請求項2記載のパイ接合SQUID。

【請求項5】

前記共晶は、 Sr_2RuO_4 とRuとの共晶である請求項3記載のパイ接合SQUID。

【請求項6】

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して平行な基板表面に形成されている請求項5記載のパイ接合SQUID。

【請求項7】

前記基板は、 Sr_2RuO_4 結晶、又は、 Sr_2RuO_4 とRuとの共晶、によって形成され、

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して垂直な基板表面に形成されている請求項2記載のパイ接合SQUID。

【請求項8】

前記ループ層は、前記基板表面上に、スピン一重項超伝導体となる物質を蒸着によって形成した蒸着膜である請求項2記載のパイ接合SQUID。

【請求項9】

前記基板には、ループ層のループ内側位置における磁束の透過を、当該基板において容易にするための磁束透過部が設けられている請求項2記載のパイ接合SQUID。

【請求項10】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる複数の基板分割片を接着材料によって接着してなり、

前記磁束透過部は、前記基板における前記接着材料の部分である請求項9記載のパイ接合SQUID。

【請求項11】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる基板本体を、磁束が容易に透過する材料に埋め込んで形成され、

前記磁束透過部は、前記基板において磁束が容易に透過する前記材料の部分である請求項 9 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 1 2】

前記磁束透過部は、前記基板に形成された孔である請求項 9 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 1 3】

超伝導接合構造の製造方法であって、

スピン三重項超伝導体となる物質の結晶バルクを加工して、基板を形成する基板形成工程と、

前記基板表面にスピン一重項超伝導体となる物質からなる層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、

を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 4】

超伝導接合構造の製造方法であって、

スピン三重項超伝導体になる物質と常伝導体との共晶の表面に析出した常伝導体のうち、接合用の常伝導体を選択する選択工程と、

選択した接合用の常伝導体の少なくとも一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆う層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、

を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 5】

前記選択工程では、互いに離間する対の接合用常伝導体を選択し、

前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した対の接合用常伝導体の対間隙において離間しているとともに、選択した対の接合用常伝導体それぞれをスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 6】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体上において離間しているとともに、選択した当該接合用常伝導体の一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 7】

前記共晶の表面に析出した常伝導体のうち、選択した接合用常伝導体以外の常伝導体を絶縁膜で覆う絶縁膜形成工程と、を更に含み、

前記スピン一重項超伝導体膜形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体と、前記絶縁膜の少なくとも一部とを、前記スピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである

請求項 1 4 ~ 1 6 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 8】

前記絶縁膜形成工程では、選択した接合用常伝導体の位置に開口部が形成された絶縁膜を、前記共晶の表面に形成する

請求項 1 7 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 9】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程では、前記スピン三重項超伝導体と前記スピン一重項超伝導体とによって、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されるように、前記層を形成する

請求項 1 3 ~ 1 8 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【手続補正書】

【提出日】平成23年11月28日(2011.11.28)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

スピン三重項超伝導体の単結晶を用いた基板と、
当該基板の表面に形成されたスピン一重項超伝導体のループ層と、
を有し、

前記ループ層は、前記基板に対して実質的に接合されていないループ本体領域と、前記基板に対して接合するための第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域と、を備え、

前記第 1 接合用領域及び第 2 接合用領域それぞれが前記基板と接合することで、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されている

パイ接合 S Q U I D。

【請求項 2】

前記基板は、スピン三重項超伝導体と常伝導体との共晶によって形成され、
スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体との接合に、前記基板が有する前記常伝導体の導電性を利用した

請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 3】

前記スピン三重項超伝導体は、 Sr_2RuO_4 である請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 4】

前記共晶は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶である請求項 2 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 5】

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して平行な基板表面に形成されている請求項 4 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 6】

前記基板は、 Sr_2RuO_4 結晶、又は、 Sr_2RuO_4 と Ru との共晶、によって形成され、

前記ループ層は、 Sr_2RuO_4 の結晶構造に含まれる RuO_2 面に対して垂直な基板表面に形成されている請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 7】

前記ループ層は、前記基板表面上に、スピン一重項超伝導体となる物質を蒸着によって形成した蒸着膜である請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 8】

前記基板には、ループ層のループ内側位置における磁束の透過を、当該基板において容易にするための磁束透過部が設けられている請求項 1 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 9】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる複数の基板分割片を接着材料によって接着してなり、

前記磁束透過部は、前記基板における前記接着材料の部分である請求項 8 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 10】

前記基板は、スピン三重項超伝導体からなる基板本体を、磁束が容易に透過する材料に埋め込んで形成され、

前記磁束透過部は、前記基板において磁束が容易に透過する前記材料の部分である請求

項 8 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 1 1】

前記磁束透過部は、前記基板に形成された孔である請求項 8 記載のパイ接合 S Q U I D。

【請求項 1 2】

超伝導接合構造の製造方法であって、
スピン三重項超伝導体となる物質の結晶バルクを加工して、基板を形成する基板形成工程と、
前記基板表面にスピン一重項超伝導体となる物質からなる層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、
を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 3】

超伝導接合構造の製造方法であって、
スピン三重項超伝導体になる物質と常伝導体との共晶の表面に析出した常伝導体のうち、
接合用の常伝導体を選択する選択工程と、
選択した接合用の常伝導体の少なくとも一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆う層を形成するスピン一重項超伝導体層形成工程と、
を含む超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 4】

前記選択工程では、互いに離間する対の接合用常伝導体を選択し、
前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した対の接合用常伝導体の対間隙において離間しているとともに、選択した対の接合用常伝導体それぞれをスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである
請求項 1 3 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 5】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体上において離間しているとともに、選択した当該接合用常伝導体の一部をスピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである
請求項 1 3 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 6】

前記共晶の表面に析出した常伝導体のうち、選択した接合用常伝導体以外の常伝導体を絶縁膜で覆う絶縁膜形成工程と、を更に含み、
前記スピン一重項超伝導体層形成工程において形成される前記層は、選択した接合用常伝導体と、前記絶縁膜の少なくとも一部とを、前記スピン一重項超伝導体となる物質で覆うものである
請求項 1 3 ~ 1 5 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 7】

前記絶縁膜形成工程では、選択した接合用常伝導体の位置に開口部が形成された絶縁膜を、前記共晶の表面に形成する
請求項 1 6 記載の超伝導接合構造の製造方法。

【請求項 1 8】

前記スピン一重項超伝導体層形成工程では、前記スピン三重項超伝導体と前記スピン一重項超伝導体とによって、[スピン一重項超伝導体 / スピン三重項超伝導体 / スピン一重項超伝導体] のパイ接合を有する超伝導ループが形成されるように、前記層を形成する
請求項 1 2 ~ 1 7 のいずれか 1 項に記載の超伝導接合構造の製造方法。

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2010/053310
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L39/22 (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) H01L39/22 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 1996-2010 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2010 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2010 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.
X	Yasuhiro Asano et al., Josephson interferometer in a ring topology as a proof of the symmetry of Sr_2RuO_4 , Physical Review B, 2005.06.01, Vol.71, Issue 21, pp.214501-1-7	1, 4
A	K.Sengupta et al., Spontaneous Spin Accumulation in Singlet-Triplet Josephson Junctions, Physical Review Letters, 2008.10.31, Vol.101, Issue 18, pp.187003-1-4	1-19
A	V.B.Geshkenbein et al., Vortices with half magnetic flux quanta in "heavy-fermion" superconductors, Physical Review B, 1987.07.01, Vol.36, Issue 1, pp.235-238	1-19
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> 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 28 May, 2010 (28.05.10)		Date of mailing of the international search report 08 June, 2010 (08.06.10)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/053310

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Yoshiteru MAENO et al., "Spin-Triplet Superconductivity -New Quantum Condensed State in the Ruthenate-", The Journal of the Physical Society of Japan, 2001.11, Vol.56, No.11, pp.817-825	1-19
A	WO 2006/011451 A1 (Japan Science and Technology Agency), 02 February 2006 (02.02.2006), entire text; all drawings & US 2009/0261319 A	1-19
A	JP 8-153904 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 11 June 1996 (11.06.1996), entire text; all drawings (Family: none)	1-19

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 0 / 0 5 3 3 1 0									
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01L39/22 (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 (IPC)) Int.Cl. H01L39/22											
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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2010年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2010年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2010年</td> </tr> </table>				日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2010年	日本国実用新案登録公報	1996-2010年	日本国登録実用新案公報	1994-2010年
日本国実用新案公報	1922-1996年										
日本国公開実用新案公報	1971-2010年										
日本国実用新案登録公報	1996-2010年										
日本国登録実用新案公報	1994-2010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									
X	Yasuhiro Asano et al., Josephson interferometer in a ring topology as a proof of the symmetry of Sr_2RuO_4 , Physical Review B, 2005.06.01, Vol.71, Issue 21, pp.214501-1-7	1,4									
A	K.Sengupta et al., Spontaneous Spin Accumulation in Singlet-Triplet Josephson Junctions, Physical Review Letters, 2008.10.31, Vol.101, Issue 18, pp.187003-1-4	1-19									
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> 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		の日の後に公表された文献									
「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		「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									
「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		「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									
「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)		「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									
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献									
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願											
国際調査を完了した日 28.05.2010		国際調査報告の発送日 08.06.2010									
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/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) 正山 旭	4M 9276								
		電話番号 03-3581-1101	内線 3462								

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 0 / 0 5 3 3 1 0
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
A	V. B. Geshkenbein et al., Vortices with half magnetic flux quanta in "heavy-fermion" superconductors, Physical Review B, 1987.07.01, Vol.36, Issue 1, pp.235-238	1-19
A	前野悦輝 他, "スピン三重項超伝導-ルテニウム酸化物で実現した新しい量子凝縮状態-", 日本物理学会誌, 2001.11, Vol.56, No.11, pp.817-825	1-19
A	WO 2006/011451 A1 (独立行政法人科学技術振興機構) 2006.02.02, 全文、全図 & US 2009/0261319 A	1-19
A	JP 8-153904 A (日本電信電話株式会社) 1996.06.11, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-19

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(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, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, 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, IS, JP, KE, KG, KM, 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, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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

特許法第30条第1項適用申請有り

(72)発明者 中川 竜司

日本国京都府京都市左京区吉田本町 国立大学法人京都大学大学院理学研究科内

Fターム(参考) 4M113 AA51 AA54 AC06 BC08 CA13 CA14 CA33 CA34

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。