

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5574520号
(P5574520)

(45) 発行日 平成26年8月20日(2014.8.20)

(24) 登録日 平成26年7月11日(2014.7.11)

(51) Int. Cl.		F I	
HO 1 B	12/06	(2006.01)	HO 1 B 12/06
CO 1 G	1/00	(2006.01)	CO 1 G 1/00 S
GO 1 N	29/00	(2006.01)	GO 1 N 29/20
GO 1 R	27/02	(2006.01)	GO 1 R 27/02 R

請求項の数 6 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2008-232617 (P2008-232617)
 (22) 出願日 平成20年9月10日 (2008.9.10)
 (65) 公開番号 特開2009-152175 (P2009-152175A)
 (43) 公開日 平成21年7月9日 (2009.7.9)
 審査請求日 平成23年8月31日 (2011.8.31)
 (31) 優先権主張番号 特願2007-308901 (P2007-308901)
 (32) 優先日 平成19年11月29日 (2007.11.29)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 504174135
 国立大学法人九州工業大学
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号
 (74) 代理人 100090697
 弁理士 中前 富士男
 (72) 発明者 孫 勇
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州
 工業大学内
 審査官 遠藤 孝徳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超伝導体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

YBa₂Cu₃O₇ からなる薄膜の上下の表層を有し、該表層が YBa₂Cu₃O₇ のパルク材の転移温度よりも高温でかつ 150 K 以下の温度範囲で超伝導状態であることを特徴とする超伝導体。

【請求項2】

請求項1記載の超伝導体において、誘電体薄膜の表面上に前記 YBa₂Cu₃O₇ の薄膜が形成されたシートが積層されていることを特徴とする超伝導体。

【請求項3】

請求項1記載の超伝導体において、誘電体薄膜の表面上に前記 YBa₂Cu₃O₇ の薄膜が設けられた積層膜が、断面渦巻き状に巻かれて、長尺の棒状又は線状となっていることを特徴とする超伝導体。

【請求項4】

請求項1記載の超伝導体において、前記 YBa₂Cu₃O₇ の薄膜は、軸方向に沿って直線状に又はらせん状に溝部を備えた誘電体棒の表面に形成されて棒状となっていることを特徴とする超伝導体。

【請求項5】

請求項1記載の超伝導体において、誘電体薄膜の表面上に前記 YBa₂Cu₃O₇ の薄膜が設けられた積層膜が、ジグザグ状に折り畳まれて、長尺の棒状又は線状となっていることを特徴とする超伝導体。

10

20

【請求項 6】

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の超伝導体において、前記薄膜の厚みは $1 \sim 10 \mu\text{m}$ であることを特徴とする超伝導体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超伝導体（超電導体ともいう）に関する。

【背景技術】

【0002】

超伝導体は電気抵抗をゼロにすることや磁気浮上できることから、超伝導体を利用することで電力の無駄な損失の解消、機械的摩擦の除去が実現でき、超伝導体の応用範囲は全ての工業分野で広がり続けている。そして、超伝導体の応用を更に開拓するために、超伝導体の転移温度（常伝導状態から超伝導状態に転移する温度）をより上昇させる努力が行われている。ここで、超伝導体の温度特性、すなわち、転移温度と抵抗率の温度依存性を測定する場合、測定しようとする超伝導体毎に電極を付けて測定を行うことが多く、測定コストが上昇するという問題を有している。一方、超伝導体が絶縁体（誘電体）、ガス、及び真空のいずれか 1 と接した場合、超伝導体表層に転移温度が高い表面超伝導層が形成されることが理論的に予言されている。また、超伝導体の薄膜は、シャープな周波数特性を有し、かつ低損失なマイクロ波帯のフィルターとしての利用が期待されている。しかし、フィルター特性を決定付ける表面抵抗を精度よく測定する方法は未だ確立されていない（例えば、非特許文献 1 参照）。

【0003】

【非特許文献 1】スーパーコンダクティビティ コミュニケーションズ (SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATION), Vol. 9, No. 6, Dec. 2000. [平成 19 年 11 月 21 日検索]、インターネット <URL: <http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercm/48/48-6.html>>

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

酸化物超伝導体の出現により、従来の超伝導体に比較して転移温度の大幅な高温化が実現したが、転移温度の上限は 135 K 程度の温度に留まっており、実用化の妨げになっている。そこで、転移温度の高い表面超伝導の応用が期待されている。一方、超伝導体に電極を付けずに超伝導体の温度特性を測定する方法、超伝導体の極表面層の抵抗を精度よく測定する方法、超伝導体の薄膜の表面抵抗を精度よく測定する方法として、例えば、マイクロ波を用いた非接触法による測定方法が提案されている。しかし、マイクロ波を発生させる装置は構成が複雑になると共に装置コストが高くなるため、測定装置の大型化及び測定コストの増大という問題が生じる。また、超伝導体の薄膜の表面抵抗を、マイクロ波を用いて測定する場合、例えば、共振の Q 値を安定して測定すること、アンテナの設置位置の影響、マイクロ波の反射の影響等の新たな問題が発生する。

【0005】

本発明はかかる事情に鑑みてなされたもので、表面超伝導を利用した超伝導体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】

【0006】

前記目的に沿う第 1 の発明に係る超伝導体は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ からなる薄膜の上下の表層を有し、該表層が $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ のバルク材の転移温度よりも高温でかつ 150 K 以下の温度範囲で超伝導状態である。

ここで、誘電体薄膜の表面上に超伝導体薄膜（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ からなる薄膜、以下同じ）が形成されたシートが積層されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 7 】

前記目的に沿う第 2 の発明に係る超伝導体は、誘電体薄膜と該誘電体薄膜の表面上に設けた超伝導体薄膜を有する積層膜が巻かれて（断面渦巻き状に巻かれて）又はジグザグ状に折り畳まれて長尺となっている。

【 0 0 0 8 】

前記目的に沿う第 3 の発明に係る超伝導体は、軸方向に沿って直線状に又はらせん状に溝部を備えた誘電体棒の表面に超伝導体薄膜が形成されて棒状となっている。

【 0 0 0 9 】

前記目的に沿う第 4 の発明に係る超伝導体は、誘電体の管内に超伝導体微細粒子が充填されて長尺となっている。

10

【 0 0 1 0 】

前記目的に沿う第 5 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法は、両側にそれぞれ入力電極対及び出力電極対を備え水平に配置された平板状の圧電体の表面で該入力電極対及び該出力電極対の間の領域に対して隙間を設けて一定温度に保持した平板状の超伝導体を平行に配置し、前記入力電極対に印加した入力電圧により発生した弾性表面波を前記出力電極対に向けて移動させながら該弾性表面波に伴う交流電界を前記圧電体に対向する前記超伝導体の表面側から印加して、前記出力電極対で検出した前記弾性表面波による出力電圧値と前記入力電圧中の前記弾性表面波の周波数に対応する入力電圧成分値との比の値を求めて前記超伝導体の表面抵抗率を測定する。

【 0 0 1 1 】

第 5 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法において、前記入力電圧をパルス電圧とし、前記出力電圧値及び前記入力電圧成分値を前記出力電極対で測定された出力電圧及び前記入力電圧のそれぞれ的高速フーリエ変換から求め、前記弾性表面波の周波数を前記交流電界が前記超伝導体の表面で反射されて内部に侵入しない範囲の値に設定することが好ましい。

20

【 0 0 1 2 】

第 5 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法において、前記圧電体の表面と前記超伝導体との間に設けられる前記隙間は、前記弾性表面波の波長の $1/2$ 以下であることが好ましい。

【 0 0 1 3 】

第 5 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法において、前記圧電体の表面と前記超伝導体との間に設けられる前記隙間の厚みを、前記弾性表面波の 1 波長以下の範囲で変化させることができる。

30

【 0 0 1 4 】

前記目的に沿う第 6 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置は、両側にそれぞれ入力電極対及び出力電極対が設けられて水平に配置された平板状の圧電体を備え、前記入力電極対に印加した入力電圧により発生した弾性表面波を前記出力電極対に向けて移動させながら、前記圧電体の表面で該入力電極対及び該出力電極対の間の領域に対して隙間を設けて平行に配置した平板状の超伝導体の該圧電体に対向する表面側に該弾性表面波に伴って生じ該超伝導体の表面で反射されて内部に侵入しない周波数を有する交流電界を印加する弾性表面波発生手段を有している。

40

【 0 0 1 5 】

第 6 の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置において、前記弾性表面波発生手段の前記圧電体に設けられた前記入力電極対に入力電圧を印加する高周波パルス発生手段と、前記弾性表面波発生手段の前記出力電極対で測定された出力電圧及び前記入力電極対に印加された前記入力電圧をそれぞれ高速フーリエ変換して出力電圧値及び該入力電圧中の該弾性表面波の周波数に対応する入力電圧成分値をそれぞれ求め、該出力電圧値及び該入力電圧成分値との比の値から前記超伝導体の表面抵抗率を算出する信号処理手段と、前記超伝導体及び前記弾性表面波発生手段を収納する測定容器と、前記測定容器内の前記超伝導体を冷却する冷却機を備えて該超伝導体の温度を制御する温度制御手段とを有するこ

50

とが好ましい。

【発明の効果】

【0016】

第1の発明に係る超伝導体では、誘電体薄膜の表面上に超伝導体薄膜が形成されたシートが複数積層されて積層体となっているので、積層体の各超伝導体薄膜の上、下表層に表面超伝導層を形成することができ、積層体中に占める表面超伝導層の割合を高くできると共に、高温で超伝導状態を発現させることができる。

【0017】

第2の発明に係る超伝導体では、誘電体薄膜の表面上に設けた超伝導体薄膜を有する積層膜が巻かれて又はジグザグ状に折り畳まれて長尺となっているので、超伝導体薄膜の上、下表層に表面超伝導層を形成することができ、長尺の超伝導体中に占める表面超伝導層の割合を高くできると共に、高温で超伝導状態を発現させることができる。

【0018】

第3の発明に係る超伝導体では、軸方向に沿って直線状に又はらせん状に溝部を備えた誘電体棒の表面に超伝導体薄膜が形成されて棒状となっているので、超伝導体薄膜の内、外表層に表面超伝導層を形成することができ、長尺の超伝導体中に占める表面超伝導層の割合を高くできると共に、高温で超伝導状態を発現させることができる。

【0019】

第4の発明に係る超伝導体では、誘電体の管内に超伝導体微細粒子が充填されて長尺となっているので、超伝導体微細粒子の表層に表面超伝導層を形成することができ、長尺の超伝導体中に占める表面超伝導層の割合を高くできると共に、高温で超伝導状態を発現させることができる。

【0020】

第5の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法及び第6の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置においては、交流電界は超伝導体の表面で反射されて内部に侵入しないので、出力電極対に発生する出力電圧値と入力電圧中の弾性表面波の周波数に対応する入力電圧成分値との比の値の変化から、超伝導体に印加された交流電界と超伝導体の極表層部に存在する荷電粒子又は準粒子の相互作用による交流電界の吸収の有無が判定でき、超伝導体の極表層部の抵抗率（超伝導体表面抵抗率）を容易に測定することが可能になる。そして、超伝導体の温度を変化させながら超伝導体表面抵抗率を測定することで、超伝導体表面抵抗率の温度特性を求めることができる。

【0021】

第5の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法及び第6の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置においては、入力電圧をパルス電圧とし、入力電極対及び出力電極対をそれぞれ形成する電極間の距離を調整することで、超伝導体の表面で反射されて内部に侵入しない周波数の交流電界を伴う弾性表面波を容易に発生させることができると共に、高速フーリエ変換により出力電圧値と入力電圧成分値が容易に求まるので、簡単な構成で測定装置を作製でき、装置コストの低減、装置の小型化、及び測定コストの低減が可能になる。

【0022】

第5の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法においては、圧電体の表面と超伝導体との間の隙間を弾性表面波の波長の $1/2$ 以下とすることで、弾性表面波の超伝導体内への侵入を防止して、弾性表面波に伴って発生する交流電界のみを有効に超伝導体に印加することができる。

【0023】

第5の発明に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法においては、圧電体の表面と超伝導体との間に設けられる隙間の厚みを、弾性表面波の1波長以下（例えば、 $100\mu\text{m}$ 以下）の範囲で変化させる場合、交流電界の超伝導体内への侵入距離を調整でき、超伝導体の表面からの深さ方向に対する抵抗率の変化を測定できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 2 4 】

続いて、添付した図面を参照しつつ、本発明を具体化した実施の形態につき説明し、本発明の理解に供する。

ここで、図 1 (A) は本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置の説明図、(B) は非接触測定装置の信号処理手段のブロック図、図 2 (A) は同超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置の弾性表面波発生手段の動作説明図、(B) は弾性表面波発生手段の入力電極対の平面図、図 3 (A)、(B) は本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法の説明図、図 4 (A)、(B) は同超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法における抵抗率の測定方法の説明図、図 5 は本発明の第 1 の実施の形態に係る超伝導体の説明図、図 6 は本発明の第 2 の実施の形態に係る超伝導体の説明図、図 7 は本発明の第 3 の実施の形態に係る超伝導体の説明図、図 8 は本発明の第 4 の実施の形態に係る超伝導体の説明図である。

10

【 0 0 2 5 】

図 1 (A)、図 2 (A)、(B) に示すように、本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置 1 0 は、両側にそれぞれ入力電極対 1 1 及び出力電極対 1 2 が設けられて水平に配置された平板状の圧電体 1 3 (例えば、 LiNbO_3 板) を備え、入力電極対 1 1 に印加した入力電圧により発生した弾性表面波を出力電極対 1 2 に向けて移動させながら、圧電体 1 3 の表面で入力電極対 1 1 及び出力電極対 1 2 の間の領域に対して隙間 4 8 (図 3 参照) を設けて平行に配置した平板状の超伝導体の一例である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の圧電体 1 3 に対向する表面側に弾性表面波に伴って生じ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の表面で反射されて内部に侵入しない周波数を有する交流電界を印加する弾性表面波発生手段 1 5 を有している。ここで、入力電極対 1 1 と出力電極対 1 2 を結ぶ方向を圧電体 1 3 の長手方向、長手方向に直交する方向を圧電体 1 3 の幅方向として、圧電体 1 3 の幅は 8 ~ 1 5 mm、長手方向の長さは 2 5 ~ 3 5 mm、厚さは 0 . 3 ~ 0 . 8 mm である。また、圧電体 1 3 に隙間 4 8 を設けて平行に配置する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 において、圧電体 1 3 の長手方向と平行な方向を $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の長手方向、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の長手方向に直交する方向を $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の幅方向として、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の幅は 8 ~ 1 5 mm、長さは 8 ~ 1 5 mm、厚さは 0 . 3 ~ 1 μm である。

20

【 0 0 2 6 】

更に、非接触測定装置 1 0 は、弾性表面波発生手段 1 5 の圧電体 1 3 に設けられた入力電極対 1 1 に入力電圧を印加する高周波パルス発生手段の一例である高周波パルス電源 1 6 と、弾性表面波発生手段 1 5 の出力電極対 1 2 で測定された出力電圧及び入力電極対 1 1 に印加された入力電圧をそれぞれ高速フーリエ変換して出力電圧値及び入力電圧中の弾性表面波の周波数に対応する入力電圧成分値をそれぞれ求め、出力電圧値及び入力電圧成分値との比の値から $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の表面抵抗率を算出する信号処理手段 1 7 と、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 及び弾性表面波発生手段 1 5 を収納する測定容器 1 8 と、測定容器 1 8 内の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 を冷却する冷却機 1 9 を備えて $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜 1 4 の温度を制御する温度制御手段 2 0 とを有している。以下詳細に説明する。

30

40

【 0 0 2 7 】

入力電極対 1 1 は、図 2 (A)、(B) に示すように、圧電体 1 3 表面上の一方側において互いに噛み合うように対向して形成された第 1、第 2 の楕形電極 2 1、2 2 を有している。そして、第 1、第 2 の楕形電極 2 1、2 2 は、W の距離を設けて対向して平行に配置され、幅が 1 ~ 2 mm の電極基部 2 3、2 4 をそれぞれ有している。また、第 1 の楕形電極 2 1 には電極基部 2 3 から電極基部 2 4 側に直角に突出する 2 組の第 1 の電極歯状部 2 5、2 6 が距離 2 L p 離れて平行に設けられ、第 2 の楕形電極 2 2 には第 1 の楕形電極 2 1 に設けられた第 1 の電極歯状部 2 5、2 6 間の中央部に電極基部 2 4 から直角に突出するように 1 組の第 2 の電極歯状部 2 7 が設けられている。

【 0 0 2 8 】

50

ここで、第1の電極歯状部25、26は、幅が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、長さが距離Wの $90 \sim 95\%$ で、 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の間隔を有して平行に配置され基側が電極基部23に接続する電極素線部26aを備え、第2の電極歯状部27は、幅が $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、長さが距離Wの $90 \sim 95\%$ で、 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ の間隔を有して平行に配置され基側が電極基部24に接続する電極素線部27aを備えている。そして、第1、第2の櫛形電極21、22の電極基部23、24は、第1、第2のリード線28、29を介して高周波パルス電源16の出力部30に接続されている。なお、電極基部23、24間の距離Wは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14の幅に応じて設定し、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14の幅をMとした場合、例えば、Mの $0.5 \sim 0.8$ 倍である。

【0029】

なお、出力電極対12は、入力電極対11と同様の構成となつて、互いに噛み合うように対向して圧電体13表面上の他方側において形成された第1、第2の櫛形電極31、32を有し、第1、第2の櫛形電極31、32は、Wの距離を設けて対向して平行に配置され、幅が $1 \sim 2 \text{mm}$ の電極基部33、34をそれぞれ有している。そして、電極基部33、34は、第1、第2のリード線35、36を介して信号処理手段17の信号入力部37に接続されている。

【0030】

以上の構成とすることで、圧電体13を伝わる表面波の速度を v_0 とした場合、 $v_0 / 2Lp$ の周波数の入力電圧を入力電極対11に印加した場合、圧電体13は最も強力に励振され $v_0 / 2Lp$ の周波数の弾性表面波が効率的に発生する。そして、この弾性表面波に伴って、 $v_0 / 2Lp$ の周波数の交流電界が発生する。このため、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14の表面で反射されて内部に侵入しない周波数が $500 \text{kHz} \sim 500 \text{MHz}$ 、例えば、 50MHz の周波数を有する交流電界が発生するように $2Lp$ を決定する。一方、出力電極対12では、到達した弾性表面波の中で $v_0 / 2Lp$ の周波数を有する弾性表面波が最も感度よく受信される。

【0031】

図1(B)に示すように、信号処理手段17は、信号入力部37に加わる出力電圧を測定する出力電圧測定部38と、高周波パルス電源16から入力電極対11に印加されたパルス電圧(入力電圧)を測定する入力電圧測定部39と、測定された出力電圧及び入力電圧をそれぞれ高速フーリエ変換して出力電圧値及び入力電圧中の弾性表面波の周波数(50MHz)に対応する入力電圧成分値をそれぞれ求める第1の信号処理部40と、得られた出力電圧値及び入力電圧成分値の比の値から $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14の抵抗率を算出する第2の信号処理部41とを有している。更に、信号処理手段17は、出力電圧及び入力電圧の測定結果、第1、第2の信号処理部40、41の処理結果を表示する表示部42を有している。

【0032】

測定容器18は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14及び弾性表面波発生手段15を収納する密閉容器で、測定時に内部を真空状態に保つ真空ポンプ43が接続されている。また、温度制御手段20は、測定容器18内に設けられ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14を載置して $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14を冷却するヒータを備えた試料ステージ44と、試料ステージ44に冷却媒(例えば、液体窒素、液体水素、液体ヘリウム)を供給する冷却機19と、ヒータに供給する電圧を調整して $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14の温度を制御する温度制御機45とを有している。

【0033】

続いて、本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法について説明する。

図3(A)、(B)に示すように、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14は、例えば、酸化マグネシウムの基板46上に形成されており、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜14は基板46を介して測定容器18内に設けられた試料ステージ44に載置する。

【0034】

10

20

30

40

50

次いで、圧電体 13 に対して隙間 48 を設けて $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 が配置された際に $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の幅方向となる方向の中央部にその長手方向に沿って幅が距離 W の 60 ~ 80 % の露出部が形成されるように $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の幅方向の両側に絶縁膜 47 (例えば、4 フッ化エチレン樹脂製の膜) を配置し、圧電体 13 で入、出力電極対 11、12 が形成されている面側を絶縁膜 47 に密着させる。これにより、圧電体 13 の表面で入力電極対 11 及び出力電極対 12 の間の領域に対して隙間 48 を設けて $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 を配置することができる。ここで、絶縁膜 47 の厚み T 、すなわち隙間 48 の距離は、弾性表面波の波長の $1/2$ 以下であり、周波数が 50 MHz の弾性表面波の場合、5 ~ 10 μm 、例えば 5 μm である。

【0035】

$YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の配置が終了すると、測定容器 18 を密閉して真空ポンプ 43 で測定容器 18 内を真空にする。そして、冷却機 19 から試料ステージ 45 に冷却媒を供給し温度制御機 45 でヒータに供給する電力を調整して $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の温度を測定温度に保持する。次いで、高周波パルス電源 16 から入力電極対 11 に入力電圧を印加すると、圧電体 13 は励振し $v_0/2Lp$ (例えば、50 MHz) の周波数の弾性表面波が発生して周囲に広がり、その一部は出力電極対 12 に向けて移動する。このとき、弾性表面波に伴って、 $v_0/2Lp$ の周波数の交流電界が発生する。ここで、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 は、圧電体 13 の表面で入力電極対 11 及び出力電極対 12 の間の領域に対して隙間 48 を設けて配置されているので、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 には弾性表面波は伝達せず、入力電極対 11 から出力電極対 12 に向けて移動する弾性表面波に伴う交流電界のみが圧電体 13 に対向する $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の表面側に印加される。

【0036】

$YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 に印加される交流電界の周波数は、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の表面で反射されて内部に侵入しないので、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 に印加された交流電界は $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の極表層部に存在する荷電粒子又は準粒子との間で相互作用を起こし、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 が超伝導状態に転移していない場合 (表面抵抗が大きな場合) は交流電界の吸収が生じて交流電界の強度が低下し、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 が超伝導状態に転移している場合は交流電界の吸収が発生せず交流電界の強度は低下しない。そして、弾性表面波の強度が大きいと弾性表面波に伴って発生している交流電界の強度も大きいので、入力電極対 11 で発生して $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 に沿って出力電極対 12 に到達した弾性表面波の大きさを測定し、入力電極対 11 で発生した弾性表面波の大きさと比較することで、交流電界が $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 により吸収されたか否か、すなわち、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 が超伝導状態に転移しているか否か (表面抵抗率が存在するか否か) が判定できる。

【0037】

図 4 (A) に示すように、入力電極対 11 に印加される入力電圧はパルス電圧なので、入力電圧を高速フーリエ変換 (FFT 変換) することにより、入力電圧を構成する交流電圧の周波数と対応する入力電圧成分値が判る。一方、出力電極対 12 で測定される出力電圧は、発生した弾性表面波の周波数が $v_0/2Lp$ (図 4 では 50 MHz) なので、図 4 (B) に示すように、FFT 変換することにより周波数 $v_0/2Lp$ の出力電圧値が判る。

【0038】

従って、入力電圧を構成する交流電圧の周波数と入力電圧成分値の関係から弾性表面波の周波数 $v_0/2Lp$ に対応する入力電圧成分値 V_{IN} を求め、出力電圧値 V_{OUT} と周波数 $v_0/2Lp$ に対応する入力電圧成分値 V_{IN} との比の値 V_{OUT}/V_{IN} を求めると、 V_{OUT}/V_{IN} の値は $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の極表層部で交流電界が吸収された割合と関係し、 V_{OUT}/V_{IN} の値に基づいて、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の表面抵抗率が得られる。なお、パルス電圧は、入力電極対 11 に周期的に (例えば、 10^{-4} ~ 10^{-3} 秒、例えば、 10^{-5} 秒間隔で) 印加するので、複数個のパルス電圧の印加毎に得られる V_{OUT}/V_{IN} から V_{OUT}/V_{IN} の平均値を求め、その平均値から YBa

10

20

30

40

50

$YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の表面抵抗率を求める。そして、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の温度を変えながら V_{OUT} / V_{IN} の平均値を求めることで、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜 14 の表面抵抗率の温度特性が求まる。

【0039】

図5に示すように、本発明の第1の実施の形態に係る超伝導体50は、誘電体薄膜の一例である4フッ化エチレン樹脂膜51（例えば、厚みが1～50 μ m）の表面上に超伝導体薄膜の一例である $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52（例えば、厚みが1～10 μ m）が形成されたシート53が複数積層されて、例えば、厚みが0.1～1mmの積層体となっている。なお、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52は、4フッ化エチレン樹脂膜51の表面上に、例えば、スパッタリングにより形成される。ここで、超伝導体50では、各 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52の上下に4フッ化エチレン樹脂膜51が配置されているので、超伝導体50を冷却すると、バルク状態の $YBa_2Cu_3O_7$ が超伝導状態になる転移温度よりも高温で、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52の上下表層に表面超伝導層が形成される。従って、超伝導体50を誘電体の一例である4フッ化エチレン樹脂のケース54内に収納し、超伝導体50の両端面に各 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52の端面を連結する電極55、56を設けると、超伝導体50を用いて電流を効率的に流すことができる。そして、各 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜52の上、下表層に表面超伝導層が形成されるため、超伝導体50に流れる電流は各表面超伝導層に分配されることになり、大電流を超伝導体50を介して効率的に流すことができる。

【0040】

図6に示すように、本発明の第2の実施の形態に係る超伝導体57は、誘電体薄膜の一例である4フッ化エチレン樹脂膜58（例えば、厚みが1～50 μ m）と4フッ化エチレン樹脂膜58の表面上に設けた超伝導体薄膜の一例である $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59（例えば、厚みが1～10 μ m）を有する積層膜60が断面渦巻き状に巻かれて長尺の棒状又は線状となっている。ここで、棒状とは、直線状となって折り曲げや巻回が容易にできない形状をいい、線状とは、折り曲げや巻回が容易にできる形状をいう。なお、4フッ化エチレン樹脂膜58の表面上への $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59の形成は、例えば、スパッタリングにより行う。また、超伝導体57は、積層膜60を断面が円形になるように巻いたが、断面正方形、断面長方形、断面長円形（楕円）等任意の形状となるように巻くこともできる。

【0041】

そして、超伝導体57では、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59の上下には4フッ化エチレン樹脂膜58が配置されているので、超伝導体57を冷却すると、バルク状態の $YBa_2Cu_3O_7$ が超伝導状態になる転移温度よりも高温で、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59の上下表層に表面超伝導層が形成される。従って、超伝導体57を誘電体の一例である4フッ化エチレン樹脂のケース61内に収納し、超伝導体57の両端面に $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59の端面と連結する電極62、63を設けると、超伝導体57を用いて電流を効率的に流すことができる。そして、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59は巻かれているため、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜59の上、下表層に形成される表面超伝導層の断面積を大きくすることができる。その結果、超伝導体57に流す電流を各表面超伝導層に分配することができ、大電流を超伝導体57を介して効率的に流すことができる。

【0042】

図7に示すように、本発明の第3の実施の形態に係る超伝導体64は、軸方向に沿った直線状の溝部65（例えば、幅が0.05～0.8mm、深さが0.05～0.5mm）が周方向に複数形成された誘電体棒の一例である4フッ化エチレン樹脂棒66（例えば、直径が0.5～3mm）の表面に超伝導体薄膜の一例である $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67（例えば、厚みが1～10 μ m）が形成されて棒状となっている。なお、4フッ化エチレン樹脂棒66の表面上への $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の形成は、例えば、スパッタリングにより行う。また、溝部は、4フッ化エチレン樹脂棒66にらせん状に形成してもよい。更に、表面に $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67が形成された4フッ化エチレン樹脂棒66を複

10

20

30

40

50

数本束ねて4フッ化エチレン樹脂のケースに収納することもできる。

【0043】

ここで、超伝導体64では、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の内表面は4フッ化エチレン樹脂棒66と接し、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の外表面は空気と接触しているため、超伝導体64を冷却すると、バルク状態の $YBa_2Cu_3O_7$ が超伝導状態になる転移温度よりも高温で、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の内外表面層に表面超伝導層が形成される。従って、超伝導体64を誘電体の一例である4フッ化エチレン樹脂のケース68内に収納し、超伝導体64の両端面に $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の端面と連結する電極69、70を設けると、超伝導体64を用いて電流を効率的に流すことができる。そして、4フッ化エチレン樹脂棒66の側面には軸方向に沿って溝部65が形成されているため、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜67の内、外表層に形成される表面超伝導層の断面積を大きくすることができる。その結果、超伝導体64に流す電流を各表面超伝導層に分配することができ、大電流を超伝導体64を介して効率的に流すことができる。

10

【0044】

図8に示すように、本発明の第4の実施の形態に係る超伝導体71は、誘電体の一例である4フッ化エチレン樹脂の管72（例えば、内径が1～3mm）内に超伝導体微細粒子の一例である $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73（例えば、粒径が0.1μm以下）が充填され、管72の両端が導電性部材74、75で封じられて長尺の棒状又は線状となっている。なお、 $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73が充填された管72内は、真空又は不活性ガス（例えば、ヘリウムガス、アルゴンガス、又は窒素ガス）雰囲気中に保たれている。このため、超伝導体71を冷却すると、バルク状態の $YBa_2Cu_3O_7$ が超伝導状態になる転移温度よりも高温で、 $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73の表層に表面超伝導層が形成される。そして、超伝導体71では、 $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73が互いに接触すると共に、管72の両端部に存在する $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73は導電性部材74、75の内面にも接触するので、両端の導電性部材74、75は、 $YBa_2Cu_3O_7$ 微細粒子73に形成された表面超伝導層を介して接続することになって、超伝導体71を用いて電流を効率的に流すことができる。

20

【実施例】

【0045】

次に、本発明の作用効果を確認するために行った実施例について説明する。

30

[実施例1]

酸化マグネシウムの基板の上に形成した厚さ0.4μmの $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を試料とした。そして、測定容器内に設けられた試料ステージに基板を介して $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を載置し、50MHzの周波数の弾性表面波の励振及び受信が可能ないように形成した入力電極対及び出力電極対を備えた幅10mm、長さ30mm、厚さ0.5mmのLiNbO₃板に対して、5μm隙間を設けて基板の上に形成された $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を対向配置した。次いで、測定容器内を真空にして、20～400Kの温度範囲で1Kの温度間隔で温度を上げながら $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面抵抗率を測定しその昇温過程での温度特性を求めた。その結果を、図9に示す。図9から、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面抵抗率は300K付近の温度から徐々に減少し、200K付近で最小値を示し、低温になるにつれて上昇し150K以下では一定値となった。

40

【0046】

[実施例2]

実施例1で使用したのと同様の $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜に対して、その表面に酸素を吸着させた後、実施例1と同様の方法で表面抵抗率を測定しその温度特性を求めた。その結果を、図10に示す。酸素を吸着させることにより、300K付近における $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面抵抗率の減少が顕著になると共に、150K以下で一定となる表面抵抗率の値が低下した。これは、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面に存在する酸素欠陥が、酸素の吸着により回復した効果と考えられる。

【0047】

50

[実施例 3]

実施例 2 で使用した $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を水素雰囲気中に曝した後、実施例 1 と同様の方法で表面抵抗率を測定しその温度特性を求めた。その結果を、図 11 に示す。

【 0048 】

[実施例 4]

また、実施例 1 で使用したのと同様の $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜に対して、真空状態で表面抵抗率の温度特性を測定し、次いで、測定容器内に酸素ガスを注入して $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面に酸素を吸着させた状態で表面抵抗率の温度特性を測定し、更に、測定容器内を水素ガスで置換し $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を水素雰囲気中に曝した後に表面抵抗率の温度特性を測定した。その結果を、図 12 に示す。

図 11、図 12 に示すように、水素雰囲気中に $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を曝すと酸素吸着前の状態に部分的に回復するが、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面抵抗率の減少が顕著になる温度域は、酸素を吸着させた場合と大きな変化はみられなかった。従って、酸素欠陥を一度回復すると、回復の効果は持続するものと解される。

【 0049 】

一方、バルク状の $YBa_2Cu_3O_7$ では、超伝導状態になる転移温度は約 90 K であることが判明している。従って、図 9 ~ 図 12 において、90 K 以下の表面抵抗率の値が超伝導状態に対応していると考えられるので、 $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の極表層部における超伝導状態への転移温度は、バルク状の $YBa_2Cu_3O_7$ より高温側に移動していると解される。このため、超伝導体を表層部の影響が強い形状、例えば、極細のファイバー、厚みの非常に薄いパイプとすることで、超伝導状態への転移温度の上昇が可能になる。また、表層部では、超伝導体を構成している元素の欠損、例えば、 $YBa_2Cu_3O_7$ では酸素の欠損による表面欠陥の影響が大きくなると考えられるが、実施例 2 の結果から、表面欠陥を回復させることで、超伝導体の特性の安定化と向上が可能になる。

【 0050 】

[実施例 5]

実施例 1 で使用したのと同様の $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜に対して、実施例 1 と同様の方法で表面抵抗率を測定しその昇温過程及び降温過程での温度特性を比較した。その結果を、図 13 に示す。図 13 に示すように、降温過程では、3 段階に渡って不連続な表面抵抗率の低下が観察された。各不連続は、表面超伝導の核形成、核成長、及び核合体の発生にそれぞれ対応していると解される。

【 0051 】

[実施例 6]

実施例 1 で使用したのと同様の $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を測定容器の試料ステージに基板を介して載置し、真空中に 96、120、及び 172 時間保持した後、実施例 1 と同様の方法で表面抵抗率を測定しその昇温過程での温度特性を比較した。その結果を、図 14 に示す。真空中での保持時間が長いほど $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面吸着ガス量は減少するので、図 14 に示す温度特性の違いは、表面超伝導状態が $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜の表面に吸着しているガス量の影響を受けることを示している。

【 0052 】

以上、本発明を、実施の形態を参照して説明してきたが、本発明は何ら上記した実施の形態に記載した構成に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載されている事項の範囲内で考えられるその他の実施の形態や変形例も含むものである。

例えば、4 フッ化エチレン樹脂膜と 4 フッ化エチレン樹脂膜の表面上に設けた $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜を有する積層膜をジグザグ状に折り畳んで長尺の棒状又は線状とすることもできる。

超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法では、圧電体として $LiNbO_3$ を使用したが、 $BaTiO_3$ 等の他の材質のものも使用できる。また、超伝導体として $YBa_2Cu_3O_7$ を使用したが、他の材質の超伝導体についても本測定方法は適用可能である。

更に、超伝導体の幅方向の両側に超伝導体の長手方向に沿って配置する絶縁膜の厚みを一

10

20

30

40

50

定にしたが、絶縁膜の厚みを弾性表面波1波長以下の範囲、例えば、 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ の範囲で変化させて圧電体と超伝導体との間の隙間の厚みを変えて測定を行うこともできる。隙間の厚みを変えることで、交流電界の超伝導体内への侵入距離を調整することができる。これによって、超伝導体表面抵抗率の表面からの深さ方向依存性を求めることができる。

【図面の簡単な説明】

【0053】

【図1】(A)は本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置の説明図、(B)は非接触測定装置の信号処理手段のブロック図である。

【図2】(A)は同超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置の弾性表面波発生手段の動作説明図、(B)は弾性表面波発生手段の入力電極対の平面図である。

【図3】(A)、(B)は本発明の一実施の形態に係る超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法の説明図である。

【図4】(A)、(B)は同超伝導体表面抵抗率の非接触測定方法における抵抗率の測定方法の説明図である。

【図5】本発明の第1の実施の形態に係る超伝導体の説明図である。

【図6】本発明の第2の実施の形態に係る超伝導体の説明図である。

【図7】本発明の第3の実施の形態に係る超伝導体の説明図である。

【図8】本発明の第4の実施の形態に係る超伝導体の説明図である。

【図9】実施例1における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【図10】実施例2における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【図11】実施例3における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【図12】実施例4における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【図13】実施例5における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【図14】実施例6における超伝導体抵抗率の温度特性を示すグラフである。

【符号の説明】

【0054】

10：超伝導体表面抵抗率の非接触測定装置、11：入力電極対、12：出力電極対、13：圧電体、14： $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜、15：弾性表面波発生手段、16：高周波パルス電源、17：信号処理手段、18：測定容器、19：冷却機、20：温度制御手段、21：第1の櫛形電極、22：第2の櫛形電極、23、24：電極基部、25、26：第1の電極歯状部、26a：電極素線部、27：第2の電極歯状部、27a：電極素線部、28：第1のリード線、29：第2のリード線、30：出力部、31：第1の櫛形電極、32：第2の櫛形電極、33、34：電極基部、35：第1のリード線、36：第2のリード線、37：信号入力部、38：出力電圧測定部、39：入力電圧測定部、40：第1の信号処理部、41：第2の信号処理部、42：表示部、43：真空ポンプ、44：試料ステージ、45：温度制御機、46：基板、47：絶縁膜、48：隙間、50：超伝導体、51：4フッ化エチレン樹脂膜、52： $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜、53：シート、54：ケース、55、56：電極、57：超伝導体、58：4フッ化エチレン樹脂膜、59： $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜、60：積層膜、61：ケース、62、63：電極、64：超伝導体、65：溝部、66：4フッ化エチレン樹脂棒、67： $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 薄膜、68：ケース、69、70：電極、71：超伝導体、72：管、73： $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 微細粒子、74、75：導電性部材

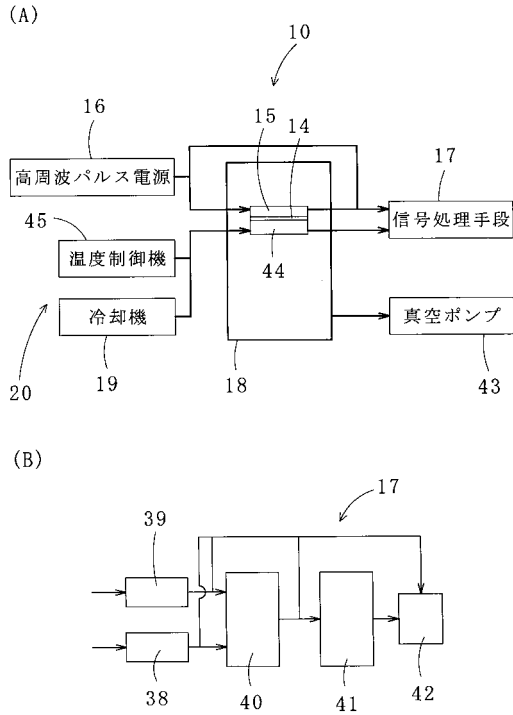
10

20

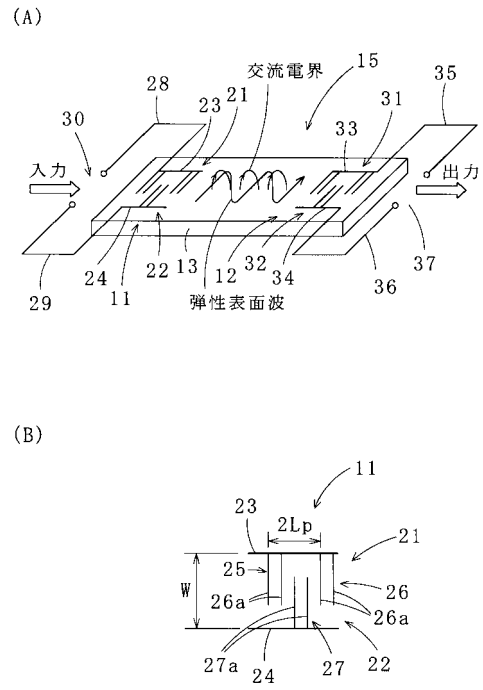
30

40

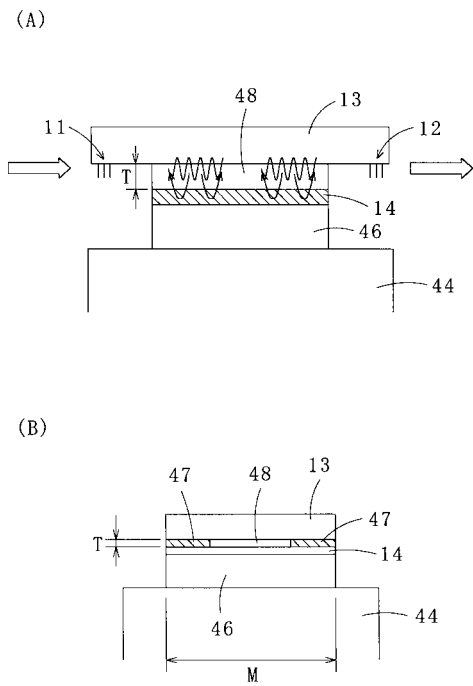
【図1】



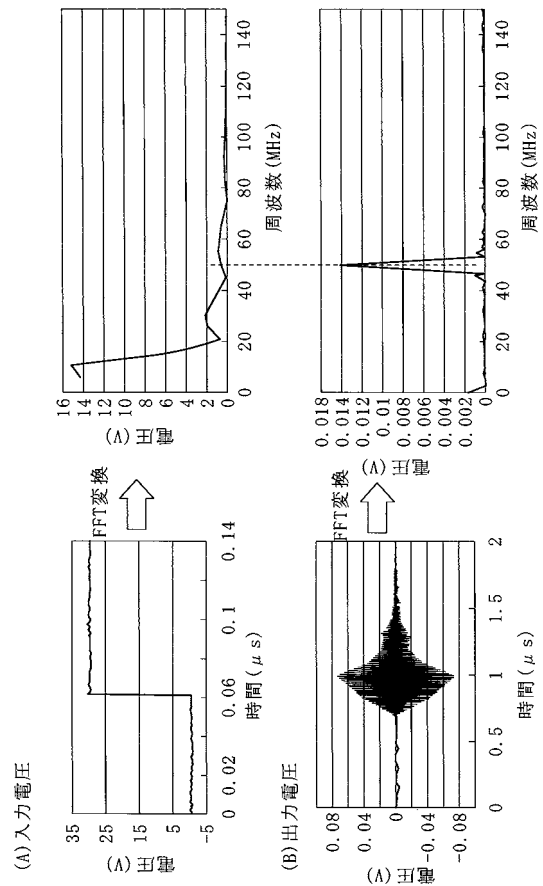
【図2】



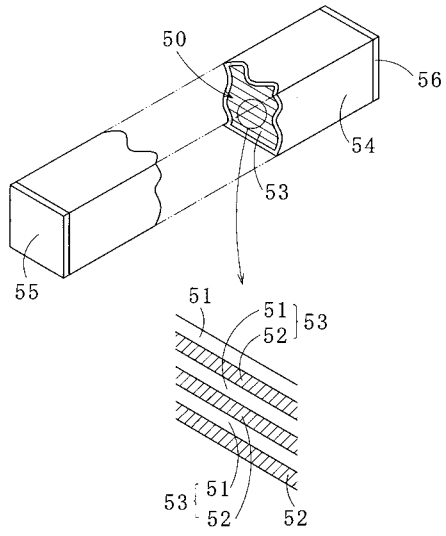
【図3】



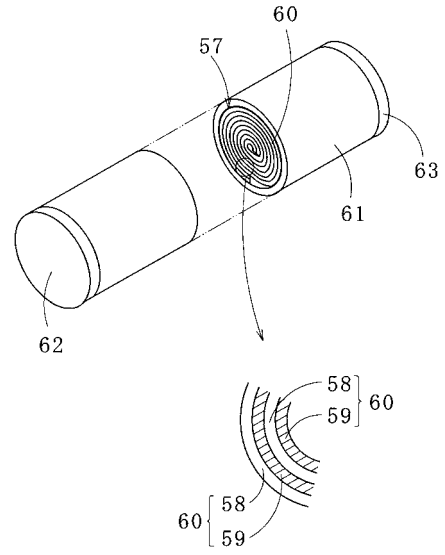
【図4】



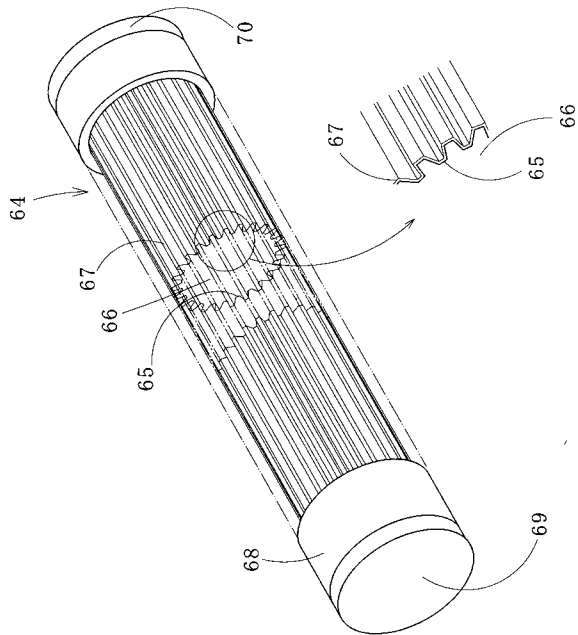
【図5】



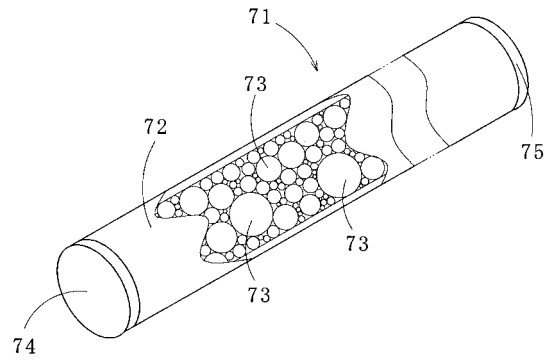
【図6】



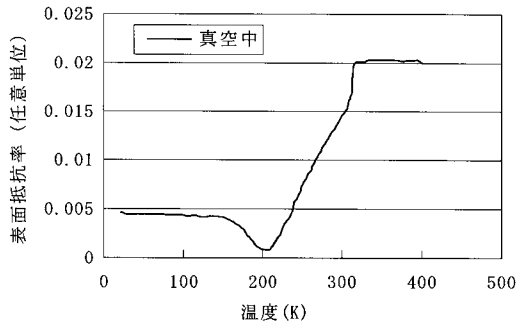
【図7】



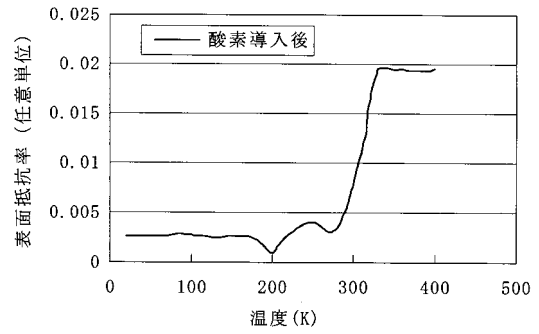
【図8】



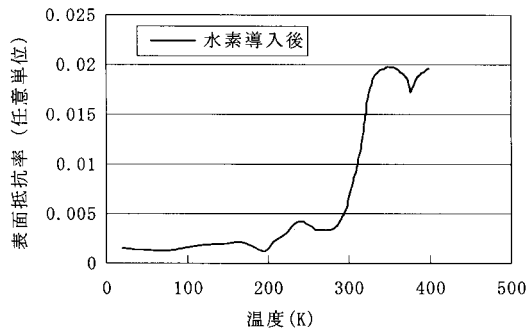
【 図 9 】



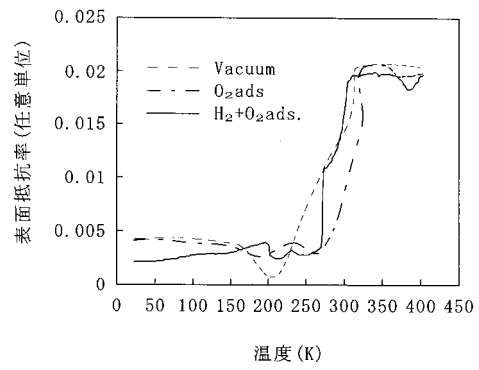
【 図 10 】



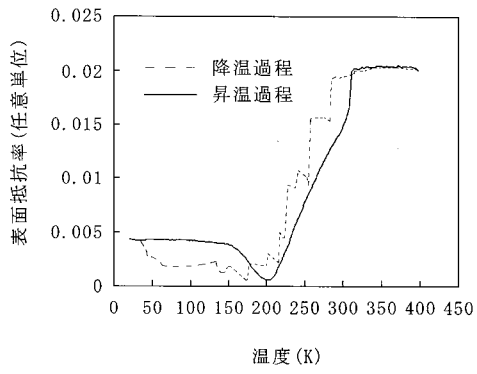
【 図 11 】



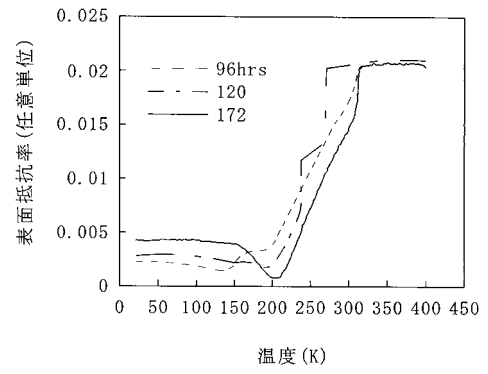
【 図 12 】



【图 13】



【图 14】



フロントページの続き

(56)参考文献 特許第3478543(JP, B2)

特開2002-289049(JP, A)

特公昭64-8882(JP, B2)

特開平1-188564(JP, A)

特表平3-501672(JP, A)

特許第2792562(JP, B2)

特開昭64-50575(JP, A)

特公平7-19921(JP, B2)

特許第2506130(JP, B2)

特許第3253295(JP, B2)

特表2002-527345(JP, A)

Caixia Wang, Yuping Sun, and Yuheng Zhang, "Charge carrier compensation effect in Ti doped La₂-xSrxCuO₄ system: Resisitivity and infrared spect", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 米国, American Institute of Physics, 2007年 6月15日, 第101巻、第12号, p. 123916-1~123916-7

Yong Sun, Tatsuro Miyasato, Kenta Kirimoto, Michiko Kusunoki, "Metallic-nonmetallic transition on the conductivity temperature dependence of multiwall carbon nano", APPLIED PHYSICS LETTERS, 米国, American Institute of Physics, 2005年 5月30日, 第86巻、第22号, p. 223108-1~223108-3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01B 12/00 - 13/34

C01G 1/00 - 3/14

G01N 29/00 - 29/52

G01R 27/00 - 27/32

JSTPlus(JDreamIII)

JST7580(JDreamIII)