

学 位 論 文 題 名

環境磁場下における高温超伝導体
SQUID 磁束計の低雑音化に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた生体磁場計測が行われ、脳機能の解明や心臓疾患の早期診断などに向けた研究が進められている。現在幅広く利用されている SQUID は Nb 系超伝導材料を用いた低温超伝導体 SQUID であり、冷媒として液体ヘリウムを必要とする。一方、高温超伝導材料を用いた高温超伝導体 SQUID は、熱雑音の点で低温超伝導体 SQUID より感度は劣るが、安価な液体窒素冷却で動作が可能であり、信号強度の比較的大きな心臓磁場の計測応用が期待されている。ところが、高温超伝導体 SQUID では低周波帯域における $1/f$ ノイズが大きく、生体磁場のような低周波信号の計測には問題となる。さらに、高温超伝導体 SQUID により安定で汎用性の高いシステムを開発するためには、厳重な磁気遮蔽空間を必要としない環境磁場下での安定した動作が要求される。本研究では高温超伝導体 SQUID 磁束計の環境磁場中での安定動作に向け、磁場印加状態でのデバイスの動作特性を検討した。本論文は全体として7章から構成されている。

第1章では、高温超伝導体 SQUID の有用性、および本研究の目的について述べた。

第2章では、SQUID の原理、高温超伝導体 SQUID に関する従来の研究の概略、さらに環境磁場下での動作についての概略を述べた。

第3章では、SQUID 磁束計の設計手法について述べた。低周波ノイズ増加の要因の一つである磁束トラップを抑制する目的で、磁束計を構成する $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 薄膜を幅 $5\mu\text{m}$ のストリップからなる細線構造とするとともに、磁場検出コイルの一部にフラックスダムと呼ばれる弱結合を作り込んだ。また、YBCO 薄膜を成膜する SrTiO_3 (STO) 基板は液体窒素温度において高い誘電率を示すことを考慮し、SQUID の等価回路を分布定数的に取り扱い、電流-電圧特性のシミュレーション結果から SQUID の幾何学的形状を決定した。

第4章では、SQUID 磁束計の作製プロセスについて述べた。YBCO 薄膜はレーザーアブレーション法によって STO バイクリスタル基板上に成膜した。また、フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングによって磁束計を形成した。SQUID リングの端にある幅 $2\mu\text{m}$ のブリッジがバイクリスタル線を横切ることにより粒界接合が生じ、ジョセフソン接合として振る舞う。

第5章では、磁束計の性能を評価するための計測システムに関して述べた。また、

磁気シールド環境におけるデバイスの直流特性、ノイズ特性の計測結果を示した。パーマロイ二層からなる簡易磁気シールドルーム内に一層の μ メタル製シリンダーを設置し、その内部に液体窒素デュワーを置いてデバイスの評価を行った。作製プロセスの改善により変調電圧 $10\mu\text{V}$ 以上の磁束計が再現性よく作製されるようになった。SQUID 磁束計を交流バイアス FLL 回路により駆動し、ノイズ計測を行った結果、 $100\sim 300\text{fT/Hz}^{1/2}$ のホワイトノイズレベルが得られた。

第6章では、直流磁場を印加した状態での磁束計の動作に関して述べた。SQUID へのオフセット磁束を連続的に変化した時に電圧-磁束特性において変調電圧が減衰する現象を発見し、その時の磁束変化量からフラックスダムの臨界電流を推定した。磁場中冷却実験及び冷却後の磁場印加実験により、フラックスダムの臨界電流の磁場依存性を調べた結果、印加磁場の増加に対して粒界接合の臨界電流は減少する傾向を示し、デバイス冷却後の磁場印加では、磁場に対して臨界電流がランホーファー的に減少することが分かった。磁場中冷却実験では印加磁場 $25\mu\text{T}$ に低周波ノイズ増加の閾値が見られた。粒界接合付近への磁束収束効果により、フラックスダムの臨界電流が低下したためと推定した。

バイクリスタル基板を用いた場合、ジョセフソン接合以外にもバイクリスタル線上に沿って粒界接合ができる。こうした粒界接合内に侵入した磁束ボルテックスが接合内を移動すると、SQUID の出力電圧がゆらぎ、低周波ノイズとして観測される。そこで、磁場検出コイルの粒界接合に沿ってスロットを形成し、磁束ボルテックスの運動を止めることにより、低周波ノイズの増加が抑制できることを示した。しかし、数 μT 以上の磁場では FLL 出力のドリフトが生じ、安定するまでに数十分を要した。フラックスダムが電圧状態になり、多数の磁束が通過する際、粒界接合周辺に磁束トラップが生じノイズの増加につながったと推察した。

以上の結果から、本研究で作製したデバイスは冷却時の環境磁場が $25\mu\text{T}$ 以下であり、冷却後の磁場変化が約 $0.5\mu\text{T}$ 以下という条件であれば、低周波ノイズの増加を生じることなく磁場計測が可能である。最後に、作製したデバイスを用いて簡易磁気シールド内で計測実験を行い、リアルタイムでの心臓磁場検出が可能なことを確認した。

第7章では、本論文で得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 眞 也
副 査 教 授 河 原 剛 一
副 査 教 授 三 田 村 好 矩

学 位 論 文 題 名

環境磁場下における高温超伝導体 SQUID 磁束計の低雑音化に関する研究

超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた生体磁気計測は、脳機能の解明や心臓疾患の早期診断等の応用で注目を集めている。その中で、酸化物超伝導材料による高温超伝導体 SQUID は、安価な液体窒素冷却で動作が可能な上、計測システムを小型化出来るという利点がある。低温超伝導体 SQUID に比べ磁場感度は劣るが、比較的信号強度の高い心臓磁場計測への実用化が期待されている。高温超伝導体 SQUID の特長を活かした汎用性の高いコンパクトな計測システムを実現するには、環境雑音の影響を受ける状況でも、安定に動作する磁束計の開発が不可欠である。しかし、環境磁場下では超伝導薄膜への磁束トラップが生じやすく、低周波雑音の増加の原因となる。本研究は、磁束トラップを抑制するような高温超伝導体 SQUID 磁束計の設計および作製を行い、磁場を印加した状態での直流特性および雑音特性を計測・解析したもので、主な成果は以下の点に要約される。

SrTiO₃ バイクリスタル基板上に成膜した YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 薄膜を用いて直結型 SQUID 磁束計を作製した。プロセス技術を改善することで、変調電圧 10 μ V 以上、白色雑音レベル 200~300 fT/Hz^{1/2} の素子が再現性良く作製可能となり、100 fT/Hz^{1/2} 以下の高感度な素子も実現できるようになった。

磁束計全体に 45 μ m×5 μ m のスロットあるいは 5 μ m×5 μ m のホールを 5 μ m 間隔で形成し、幅 5 μ m の YBCO の細線で磁束計を構成することにより、冷却時の磁束トラップを抑制した。また、磁場検出コイルの一部にフラックスダムと

呼ばれる弱結合を設けることで、素子冷却後の磁場変動に伴う遮蔽電流を制限し、YBCO 薄膜のエッジ部への磁束トラップを抑制する構造とした。

磁場中で素子を冷却した場合、電圧-磁束特性上において、冷却磁場による磁束シフトを観測した。この現象は、YBCO 薄膜への磁束トラップが発生した際、等価的にインダクタンスの非対称が生じることに起因するとしている。さらに、磁束シフトが生じる冷却磁場の閾値を元に、粒界接合近傍での磁束トラップが生じていることを明らかにしている。

オフセット磁束を連続的に SQUID に与えた場合、電圧-磁束特性における変調電圧がある閾値以上の磁束で減衰することを発見した。これは遮蔽電流がフラックスダムの臨界電流に達したことを意味し、この時の磁束変化量から臨界電流値を推定している。さらに、磁場依存性を調べた結果、冷却後の印加磁場に対してフランホーファー的な周期性を伴って臨界電流が低下することを見出し、粒界接合近傍における磁束収束効果の関与を明らかにしている。

磁場検出コイル中に存在する粒界接合における磁束ボルテックスの移動が SQUID 出力のドリフトをもたらし、雑音増加の原因となる事実を見出した。その対策として、 $\beta_L \gg 1$ の条件を満たすスロットを粒界接合に沿って形成し、磁束ボルテックスの長距離運動を抑制することで、低周波雑音が低減されることを実証している。その結果、素子冷却時の直流磁場が $25 \mu\text{T}$ 以下で、かつ素子冷却後の磁場変化が約 $0.5 \mu\text{T}$ 以下の状況、すなわち、簡易磁気シールドルーム内であれば、本研究で作製した SQUID 磁束計が十分安定に動作することが明らかとなった。

以上を要するに、著者は、磁場印加状態における高温超伝導体 SQUID 磁束計の動作特性についての新知見を得て、磁束計の構造を改善することで低周波雑音の低減を得たものであり、生体工学ならびに超伝導工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。