

学位論文題名

生体磁気計測を目的とした高温超伝導体 dc-SQUID の基礎的研究

学位論文内容の要旨

生体から発生する微弱な磁界を測定することによって局所的な神経活動の解析ができるが、神経活動により発生する磁界は非常に微弱で、SQUID(超伝導量子干渉素子)を用いて測定する必要がある。しかし、現在、生体磁気計測用の SQUID は冷却媒体として液体ヘリウムを用いており、計測装置の複雑化や操作の煩雑さ、高価格化の原因となっている。

一方、高い超伝導転移温度をもつ酸化物超伝導体においては、結晶粒界がジョセフソン弱結合としての特性をもつことが多くの研究から分かり、この弱結合を利用したエレクトロニクス素子、特に SQUID の研究・開発が盛んに行われている。酸化物超伝導体 SQUID の応用としては、高い磁界分解能を有し、液体窒素冷却で作動する生体磁気計測装置が期待されている。しかし、現在の酸化物超伝導体 SQUID には、変調電圧が低く、その結果磁束雑音が高いこと、低周波で増加する $1/f$ 雑音が存在することなどの多くの問題がある。

本研究では、液体窒素温度 77K で動作可能な、生体磁気計測を目的とした SQUID の実現に必要な基礎研究を行った。酸化物超伝導体として超伝導転移温度が約 90K の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)を用いて結晶粒界を利用したバイクリスタル接合 SQUID を作製し、その動作特性、特に磁界分解能を決める重要な要因である変調電圧の特性を明きらかとした。また、SQUID を駆動させる FLL(磁束ロック)駆動回路について、低周波帯域の雑音を相殺して消去する交流バイアス方式について検討を行い、実際に高温超伝導体 dc-SQUID を駆動させてその有効性を確かめた。

本論文は全 8 章から構成されている。第 1 章では序論として本研究の背景と生体磁気計測、特に脳磁界計測における高温超伝導体 SQUID の有用性について概説し、第 2 章では SQUID の動作原理と従来の研究について述べ、さらに微弱磁界計測の方法と問題点、とくに高温超伝導体 SQUID により計測を行う場合に問題となる点を指摘している。

第 3 章、第 4 章では SQUID の作製と測定法について述べている。SQUID の作製では、まず高い臨界温度をもつ YBCO 薄膜を SrTiO_3 結晶を張り合わせたバイクリスタル基板上に成膜して結晶粒界を形成する方法について述べ、つぎに薄膜 YBCO を光や電子ビームを使ったリソグラフィーとアルゴンプラズマによるエッチングで微細加工して SQUID の構造とする方法を記述している。SQUID の測定法では、基本となる 4 端子法による電流-電圧特性測定や、磁束印加による電圧変調特性、FLL 駆動による磁束雑音測定法などについて述べている。

第 5 章では SQUID の駆動法について新しい交流方式を検討し、実際に回路を作製して高温超伝導体 YBCO SQUID で有効であることを確認している。低周波帯域の $1/f$ 雑音としては SQUID が持つ 2 つのジョセフソン接合のパラメータ(臨界電流値やノーマル抵抗値)が時間的に変動することによる雑音が知られており、低温 SQUID よりも非常に大きな雑音が観

測されている。そこで、パラメータゆらぎの逆相成分を相殺する駆動法としてバイアス電流を正負に交替させる二重変調 FLL 方式について検討を行い、交流バイアスの周波数 f_b を磁束変調周波数 f_m より高くし、さらに f_b に同期して半周期に $\Phi_0/2$ の磁束を加え変調電圧の復調は f_m 成分のみで行う方法を考案した。タンク回路により SQUID の出力を昇圧してインピーダンス整合を行うが、このときバイアス電流の反転による過渡的電圧成分が抑制でき SQUID の変調電圧の損失もないことが確認された。その結果、生体磁気計測を行う際に問題となる低周波帯域(1~10Hz)の雑音が通常の直流バイアス方式に比べ 1/2~1/6 に低減でき、高温超伝導体 SQUID を駆動する回路としては十分に有効であることが分かった。

第6章では YBCO dc-SQUID の磁束変調電圧について調べ検討を行った。インダクタンスの異なる SQUID を同一基板上に作製し、その変調電圧を測定した結果、低温系の SQUID とは異なるインダクタンス依存性で急激に変調電圧が低下することがわかった。この原因として、すでに提案されている熱雑音がインダクタンスに結合する磁束性ゆらぎの効果に加え、ジョセフソン接合に発生する熱雑音ラウンディングによる電流-電圧特性の変化を考慮した理論式を提案し、実験値と理論値の比較検討を行った。その結果、理論値との良い一致が得られ、熱雑音効果を決めるジョセフソン接合の結合エネルギーと熱エネルギーの比の値が重要であることが分かり、熱雑音ラウンディングの影響が無視できる条件(バイアス電流値 $70\mu\text{A}$ 以上)が明きらかとなった。

また、熱雑音ラウンディングを考慮すると低温系 SQUID で最大変調電圧が得られるインダクタンスの最適条件を満足することは難しく、高温 SQUID を設計する条件としてはノーマル抵抗を大きくすることが重要と予想された。さらに、実際に粒界接合の幅を細くしてノーマル抵抗値を増加させた実験により変調電圧の向上が確認された。

第7章では磁束変調電圧に対するダンピング抵抗の効果について調べた。外部磁界を計測するために検出コイルを SQUID に直結する方法では、磁束伝達効率も SQUID のインダクタンスに比例するため、それを大きくする必要がある。しかし、インダクタンスの増加(100~300pH)により熱雑音ゆらぎによる変調電圧の低下が大きな問題となる。そこで変調電圧の低下を回復する方法として低温系 SQUID で知られている、インダクタンスに並列抵抗(ダンピング抵抗)を付加する効果について、実際に金属薄膜で形成したダンピング抵抗を SQUID に付加したものを作製し測定を行った。その結果、77K 以上の高温領域でも変調電圧の回復が見られ、高温 SQUID で始めてダンピング抵抗の効果を確認することができた。これらの結果は、これまでの数値シミュレーションや低温領域での実験結果と一致するものである。また、磁束雑音スペクトルの測定から抵抗の付加による低周波領域での雑音の増加は見られず、ホワイトノイズ領域で変調電圧の増加による雑音の減少が見られた。

第9章では本研究の成果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 眞 也
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 山 本 克 之
副 査 教 授 伊 福 部 達

学位論文題名

生体磁気計測を目的とした高温超伝導体 dc-SQUID の基礎的研究

生体から発生する微弱な磁界を測定することによって脳内の局所的な神経活動の解析ができるが、神経活動により発生する磁界は非常に微弱で、SQUID(超伝導量子干渉素子)を用いて測定する必要がある。しかし、現在、生体磁気計測用の SQUID は冷却媒体として液体ヘリウムを用いており、計測装置の複雑化や操作の煩雑さ、高価格化の原因となっている。この問題点を改善すると期待されているものに、高い超伝導転移温度をもつ酸化物超伝導体を利用した SQUID がある。しかし、現在の酸化物超伝導体 SQUID は、磁束雑音が高く、低周波で増加する $1/f$ 雑音が存在することなどの多くの問題がある。

本研究は、生体磁気計測応用のための高温超伝導体 dc-SQUID の実現に必要な技術を確認することを目的とし、実験的検討を行ったものである。

学位論文の主な結果を以下に要約する。

本論文は全9章から構成されている。第1章では序論として本研究の背景と生体磁気計測、特に脳磁界計測における高温超伝導体 SQUID の有用性について概説し、第2章では SQUID の動作原理と従来の研究について述べ、さらに微弱磁界計測の方法と問題点、とくに高温超伝導体 SQUID により計測を行う場合に問題となる点を指摘している。

第3章、第4章では $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)を使った SQUID の作製と測定法について述べている。

第5章では SQUID の駆動法について新しい交流方式を検討している。SQUID の低周波帯域の $1/f$ 雑音としては2つのジョセフソン接合のパラメータ(臨界電流値やノーマル抵抗値)が時間的に変動することによる雑音が知られている。そこで、パラメータゆらぎの逆相成分を相殺する駆動法として交流バイアスの周波数 f_B を磁束変調周波数 f_m より高くし、さらに f_B に同期して半周期に $\Phi_0/2$ の磁束を加え変調電圧の復調は f_m 成分のみで行う方法を考案して装置を試作した。実際に YBCO SQUID に適用した結果、低周波帯域(1~10Hz)の雑音が通常の直流バイアス方式に比べ $1/2\sim 1/6$ に低減できることが示され、生体磁気計測を行う回路として有効であることを確認している。

第6章では作製方法の異なるステップ接合 SQUID とバイクリスタル接合 SQUID の特性について検討を行っている。バイクリスタル接合の場合、ヒステリシスを持たない RSJ モデル的な I-V 特性を示したのに対し、ステップ接合 SQUID の場合は、RSJ モデル的ではあるが有限の超伝導電流(excess current)が見られた。この違いの原因の一つとして弱結合の構造に起因する電流位相特性の違いを指摘し、より理想的な特性の得られるバイクリスタル接合 SQUID について、以後の検討を行っている。

第7章ではインダクタンスの異なる SQUID を同一基板上に作製し、磁束変調電圧についての検討を行っている。その結果、低温系の SQUID とは異なるインダクタンス依存性を示し、急激に変調電圧が低下することがわかった。この原因として、熱雑音が入ダクタンスに結合する磁束性ゆらぎの効果に加え、ジョセフソン接合に発生する熱雑音ラウンディングによる電流-電圧特性の変化を考慮し、実験値と理論値の比較検討を行った。その結果、熱雑音ラウンディングの影響が無視できる条件(バイアス電流値 70 μ A 以上)が明らかとなった。また、高温 SQUID を設計する条件としては常伝導抵抗を大きくすることが重要であることを示し、実際に実験から変調電圧の向上することを明らかとした。これらのことは高温超伝導体 SQUID を設計する上での新しい知見である。

第8章では磁束変調電圧に対するダンピング抵抗 R_d の効果について調べている。外部磁界を計測するための検出コイルを SQUID に直結する場合、 L_s は大きくする必要がある。しかし、 L_s の増加は、熱雑音ゆらぎに起因する変調電圧の低下を導くため、大きな問題となる。そこで、実際に金属薄膜で形成した R_d を SQUID に付加したものを作製しその有効性を調べた。その結果、77K 以上の高温領域でも変調電圧の回復が見られ、高温 SQUID で始めて R_d の効果を明らかとした。また、変調電圧の増加による磁束雑音の減少が確かめられ、高温超伝導 SQUID のノイズ低減に有効であることを確認している。

第9章では本研究の結論と今後の課題および展望について総括している。

これを要するに、著者は、生体磁気計測を目的とした高温超伝導体 SQUID についてノイズ低減を実現する測定回路の開発および素子のノイズ特性についての新知見を得たものであり、生体磁気計測への応用に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。