

Performance of Superconducting Quantum Interference Devices with Large Inductive and Capacitive Elements

（高インダクタンス、高キャパシタンスをもつ超伝導量子干渉素子の特性）

学位論文内容の要旨

超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いた磁束計は最も感度の高い磁気センサである。Nb 系超伝導材料を用いて作製し、液体ヘリウム温度で動作する低温 SQUID は熱雑音が低いことから、脳磁界のような非常に微弱な生体磁気信号の計測に利用されている。ここで、SQUID の出力電圧は数 $10\ \mu\text{V}$ と低いため、室温アンプの雑音を等価的に減衰させるためにトランスやタンク回路のような整合回路を低温部に介在させている。しかし、脳磁界計測用の多チャンネル磁束計ではこの整合回路がシステム設計の自由度を制限する要因となっている。本研究では、SQUID のインダクタンスを高くすることによって SQUID と入力コイル間の磁気結合度を高め、SQUID の出力信号を増加させて低温部の整合回路を省略した汎用性の高い磁束計を実現する方法について検討を行った。

一方、高温超伝導体を使った SQUID は、熱雑音の点で低温 SQUID より感度は劣るが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界の計測応用が期待されている。しかし、高温 SQUID は通常、誘電率の高い SrTiO_3 (STO) 基板上に形成されており、STO 基板の浮遊容量による電圧変調度の低下が問題となっている。本研究では、このような高温 SQUID における高キャパシタンスの影響を明らかにすることを第二の目的として実験的検討を行った。

本論文は5つの章に分けられる。第一章は SQUID 磁束計の改善におけるこの研究の重要性について説明し、また論文の内容を概説する。

第二章は SQUID 磁束計の原理について記述する。まず、超伝導デバイスにおける2つの基本的な概念である磁束量子化とジョセフソン効果、および SQUID の基礎原理を述べ、続いて現在の磁界計測で用いられている SQUID の読み取り方法と検出コイルから SQUID に磁束を伝達する回路について説明する。さいごに、高温超伝導 SQUID の特徴をまとめて、低温 SQUID と高温 SQUID 磁束計における問題点を指摘する。

第三章は高インダクタンス低温超伝導 SQUID について、インダクタンスを増加することによる磁束伝達効率の改善と、それによる整合回路の省略と磁界検出プローブ構造のコンパクト化の可能性について議論する。続いて高インダクタンス化に伴うデメリットとして SQUID の変調電圧の減少を指摘し、それを抑制するためにダンピング抵抗をインダクタンスに並列に付加する方法について説明し、さらにタ

ンピング抵抗付き SQUID に対して行ったコンピュータ・シミュレーションの結果を述べる。以上の検討を基に、約 1 nH の値をもつ高インピーダンス SQUID のパラメータが決定され、共同研究により試作が行われた。

試作した高インダクタンス SQUID は電流-電圧 (I-V) 特性と電圧-磁束 (V- Φ) 特性の測定を行った。また、感度を決定するノイズ特性はノイズパワーのスペクトラム測定から決定したが、ノイズ測定は SQUID 出力をタンク回路からなる低温整合回路を介して室温にあるアンプと結合した場合と、本研究のねらいである SQUID 出力を室温のアンプに直接結合した場合について行った。その結果、SQUID 出力をタンク回路を介してアンプと結合させて SQUID の固有ノイズを測定した場合、ホワイトノイズは $21 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であった (Φ_0 は磁束量子)。さらにこのノイズの起源について実験的に検討した結果、高いインダクタンスに付随する磁束性ノイズではなく、電圧性ノイズが主であることがわかった。つぎに、タンク回路を取り去って室温アンプに直結した場合は、ホワイト・ノイズは $39 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}\text{Hz}$ に増加した。しかし入力コイルと SQUID 間の磁束伝達効率が改善された結果、2 次微分型検出コイルを SQUID に結合させて磁束計を構成・試作して磁界ノイズを測定すると、約 10 Hz 以上のホワイトノイズとして $8\sim 10 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ が得られた。この値は、現在の脳磁界計測用磁束計の持つ感度 $5\sim 10 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ と同等である。さらに、2 次微分型コイルによる検出プローブを用いて、ひとの脳から発生する磁界信号の検出を試みた。1 kHz の純音バーストを片耳に与え、反対側の脳半球上で計測を行った結果、100~150 fT のピーク振幅をもつ聴覚誘発脳磁界反応が明確に検出され、高インダクタンス SQUID の有効性が確認された。

第四章は、STO 基板上に作製されたいろいろな形状をもつ高温超伝導 SQUID における浮遊容量の効果について調べた結果について述べる。まず初めに SQUID の I-V 特性における高キャパシタンスの効果に関するこれまでの報告を概説し、この効果を説明するための等価回路モデルとして集中定数モデルと伝送線路モデルについて説明する。さらに、これらのモデルを使って高キャパシタンス SQUID の I-V 特性に関して行った定性的な検討の結果について述べる。つぎに、さまざまなホール形状を持った結晶粒界接合 SQUID を STO バイクルスタル結晶基板上に作製した。STO 基板上に電極と SQUID 構造を配置するためのラージスケールマスクと SQUID の微細構造を作り込むスモールスケールマスクについて、とくにバイクリスタル線に平行ないし直角なスリット状のホールを持つ SQUID のデザインとマスク設計・製作を行った。つぎにそれらのマスクを使ってスパッタエッチング加工によって SQUID を作製し、液体窒素中で I-V 特性の測定を行った。測定された I-V 特性はスリットの方に依存して特異なレゾナンス構造を示したが、先に行った等価回路モデルによる予想と比較検討した結果、STO 基板の浮遊容量による高キャパシタンス効果は、集中回路モデルよりは伝送線路モデルにより適切に説明できることが分かった。

第五章では、以上の高インダクタンス低温超伝導 SQUID と高キャパシタンス高温超伝導 SQUID に関する本研究の結論をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 眞 也

副 査 教 授 伊 福 部 達

副 査 教 授 山 本 克 之

副 査 教 授 下 澤 楯 夫

学 位 論 文 題 名

Performance of Superconducting Quantum Interference Devices with Large Inductive and Capacitive Elements

(高インダクタンス、高キャパシタンスをもつ超伝導量子干渉素子の特性)

近年、液体ヘリウム温度で動作する Nb 系超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いた磁束計が脳磁界のような非常に微弱な生体磁気信号の計測に利用されるようになった。ここで、SQUID の出力電圧は数 $10 \mu\text{V}$ と低いため、室温増幅器の雑音を等価的に減衰させるためにトランスやタンク回路のような整合回路を低温部に介在させるのが普通である。しかし、脳磁界計測用の多チャンネル磁束計ではこの整合回路がシステム設計の自由度を制限する要因となっており、整合回路を用いないコンパクトな磁束計とそれに適する出力読み取り方式の開発が望まれている。

一方、高温超伝導体を使った SQUID は、熱雑音の点で低温 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界の計測応用が期待されている。しかし、高温 SQUID は通常、誘電率の高い SrTiO_3 (STO) 基板上に形成されており、STO 基板の浮遊容量による電圧変動の低下が問題となっている。そのため、高い浮遊容量を持つ SQUID の動作メカニズムの解析が重要な研究課題となっている。

本論文は、このような現状にある脳磁界計測用低温 SQUID 磁束計システムにおいて、多チャンネル化の要求を満たす上で必要となる低温整合回路を省略した汎用性の高いコンパクトな磁束計を実現することを目的とし、さらに高温 SQUID の動作特性における高キャパシタンスの影響を明らかにすることを第二の目的として実験的検討を行い、得られた知見をまとめたものである。本研究における主な成果は以下の点に要約される。

(1) 低温 SQUID 磁束計については、インダクタンスを増加させることによって磁束伝達効率を改善し、それによって整合回路の省略と磁界検出プローブ構造のコンパクト化を達成することを着想している。そこで、高インダクタンス化に伴い SQUID の変動電圧が減少する欠点を抑制するためにダンピング抵抗をインダクタンスに並列に付加する方法を採用し、約 1 nH の値をもつ高インダクタンス SQUID を設計して共同研究により試作した。

(2) 試作した高インダクタンス SQUID の出力を整合回路を介さずに室温にある増幅器に直接結合する動作方式を実現し、ノイズ・スペクトラムの測定を行っている。その結果、ノイズレベルとして $39 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ (Φ_0 は磁束量子) の値を得た。つぎに、2 次微分型コイルに SQUID を結合した検出プローブを試作して磁束計を構成し、約 10 Hz 以上のホワイトノイズとして、現在の脳磁界計測用磁束計の持つ感度と同等である $8\sim 10 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ の磁場感度を得ることに成功した。また、ホワイトノイズの起源について検討を行い、高インダクタンスに付随する磁束性ノイズではなく、電圧性ノイズが主であることを明らかにしている。

(3) 試作した 2 次微分型コイルによる検出プローブを用いて、ヒトの脳から発生する磁界信号の検出を試みている。1 kHz の純音バーストを被験者の片耳に与え、反対側の脳半球上で計測を行った結果、100~150 fT のピーク振幅をもつ聴覚誘発脳磁界反応を明瞭に検出することに成功し、高インダクタンス SQUID の有効性を実証した。

(4) 高温 SQUID に関しては、バイクリスタル線に平行ないし直角なスリット状のホールを持つ SQUID のデザインを考案し、マスクとレジストを用いたパターンの転写とスパッタエッチング加工によって STO 基板上に結晶粒界接合型 SQUID を作製している。次に、液体窒素中で I-V 特性を測定し、スリットの方方向に依存した特異なレゾナンス構造を観測し、電圧変調度の低下の要因になっていることを示した。さらに、I-V 特性上のレゾナンスを STO 基板の浮遊容量の効果により説明するために集中定数モデルと伝送線路モデルの二つの等価回路モデルを使って定性的に検討を行っている。その結果、浮遊容量による高キャパシタンス効果は、伝送線路モデルによって適切に説明できることを明らかにした。

以上を要するに、著者は、生体磁気計測を目的とした低温および高温 SQUID 磁束計について、多チャンネル化の要求と高温超伝導デバイス導入を満たすための新知見を得たものであり、生体工学および超伝導電子工学の進歩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。