

学位論文題名

Vortex dynamics in superconducting thin film devices
measured by direct flux detection method(直接磁束検出法による超伝導薄膜デバイスの
磁束量子ダイナミクスの計測と解析)

学位論文内容の要旨

近年、液体ヘリウム温度で動作する Nb 系低温超伝導材料から作製された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。しかし、冷媒である液体ヘリウムは高価であり、取り扱いが難しいという欠点のために広範囲な普及には至っていない。そこで、安価な液体窒素冷却で動作が可能である、酸化物高温超伝導体から作製した SQUID 磁束計に関する研究が盛んに行われている。しかし、現在作製されている高温超伝導 SQUID では、生体磁気計測で関心のある低周波において、SQUID を構成する薄膜中に捕獲された磁束量子の運動による大きな $1/f$ 磁束雑音の問題となっている。そのため、高温超伝導薄膜中への磁束量子の捕獲を防止するような SQUID 形状の設計や、磁束量子の熱励起運動の解析が重要な研究課題となっている。また、低雑音化のための設計パラメータを決定するためには、高温超伝導薄膜中の磁束量子運動に関する基礎的な研究が必要である。

本研究は、低温および高温超伝導薄膜デバイス中の磁束量子運動を直接磁束検出法を用いて検出し、その磁束ノイズ特性を解析して磁束量子ダイナミクスを明らかにすることを第一の目的とした。さらに高温 SQUID 磁束計の低雑音化に必要な知見を得ることを第二の目的として実験的検討を行った。直接磁束検出法は、磁束量子運動による磁束のゆらぎを SQUID と磁気結合した超伝導検出コイルによって直接検出し、その時間特性を解析する方法である。直接磁束検出法を用いると、通常 of 四端子法による電流-電圧測定では検出できない磁束量子運動のオンセットを高感度で検出する事が出来る。以下に、本論文の内容を各章に分けて要約する。

第一章では、現在作製されている高温超伝導 SQUID の生体磁気計測への応用について述べ、低周波領域における $1/f$ 磁束雑音が磁束量子の熱励起運動によって起こることを述べた。

第二章では、超伝導体中の磁束量子運動の基礎的な現象論と、その測定法について議論した。特に、従来の四端子法による電流-電圧測定 of 欠点について述

べ、直接磁束検出法による磁束ノイズ測定が有用であることを指摘した。

第三章では、直接磁束検出法における磁束ゆらぎ検出の原理を説明した。磁束検出は、第二種超伝導体中の磁束量子一個の作る磁界が、超伝導体が十分大きい場合、超伝導体表面近傍で磁気単磁荷(磁気モノポール)一個のつくる磁界で近似されるという、モノポール近似に基づいている。モノポール近似を実現するには、測定する薄膜試料と超伝導検出コイルとの配置に配慮しなければならないため、検出コイルに鎖交する磁束を数値計算によってシミュレーションし、最適な薄膜試料と検出コイルの配置を決定した。また、直接磁束検出法では SQUID が重要な働きをするため、その動作原理を簡単に説明した。

第四章では、第三章の数値計算の結果に基づいて設計し、試作した直接磁束検出法による磁束ノイズ測定装置を説明した。

第五章では、試作した磁束ノイズ測定装置を用いて測定した、膜質の異なる低温超伝導 Nb 薄膜上に作製した膜厚変化型ブリッジ(VTB)の磁束ノイズ特性について述べた。エピタキシャル成長させた Nb 薄膜上の VTB では臨界電流以上で磁束がいくつかの離散的な値をスイッチするマルチプル・ステップ・ノイズ(MSN)を観測した。MSN の最小ステップ幅は数値計算による磁束量子一個の運動に対応する磁束変化にほぼ一致し、このことからモノポール近似が実現されて磁束ゆらぎが検出されていると結論した。一方、多結晶 Nb 薄膜上に作製した VTB は、エピタキシャル Nb 薄膜 VTB と大きく異なる磁束ノイズ特性を示し、そのステップ幅の分布の解析から、薄膜中に捕獲された多数の磁束量子が臨界電流以上でなだれを生じる可能性を示唆した。

第六章では、 SrTiO_3 (STO) バイクリタル基板上に作製した高温超伝導 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 薄膜粒界接合の磁束ノイズ特性について述べた。高温超伝導試料の磁束ノイズ特性は、試料の冷却過程における磁界に敏感に依存した。異なる磁界中で冷却した試料の磁束ノイズ特性を比較することにより、電流バイアスした粒界接合に隣接した粒界接合が、冷却磁界と冷却過程に依存した低周波のスイッチング・ノイズを示すことを見出した。さらに、直流電圧発生のオンセット直下のバイアス電流において高周波パルス列を観測し、その時間波形のステップ幅とバイアス電流依存性から、電流バイアスした粒界接合の電圧状態への移行に伴う磁束ノイズであると推定した。以上の結果をまとめて、高温超伝導薄膜デバイスがその周辺に弱結合を持つ場合、デバイスの磁束ノイズ特性が冷却環境に大きく依存する可能性があるかと結論した。

第七章では、本論文の成果をまとめて結論を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 真 也

副 査 教 授 下 澤 楯 夫

副 査 教 授 山 本 克 之

学 位 論 文 題 名

Vortex dynamics in superconducting thin film devices measured by direct flux detection method

(直接磁束検出法による超伝導薄膜デバイスの
磁束量子ダイナミクスの計測と解析)

近年、液体ヘリウム温度で動作する Nb 系低温超伝導材料から作製された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。しかし、冷媒である液体ヘリウムは高価であり、取り扱いが難しいという欠点のために広範囲な普及には至っていない。そこで、安価な液体窒素冷却で動作が可能である、酸化物高温超伝導体から作製した SQUID 磁束計に関する研究が盛んに行われている。しかし、現在作製されている高温超伝導 SQUID では、生体磁気計測で関心のある低周波において、SQUID を構成する薄膜中に捕獲された磁束量子の運動による大きな $1/f$ 磁束雑音が問題となっている。そのため、高温超伝導薄膜中への磁束量子の捕獲を防止するような SQUID 形状の設計や、磁束量子の熱励起運動の解析が重要な研究課題となっている。また、低雑音化のための設計パラメータを決定するためには、高温超伝導薄膜中の磁束量子運動に関する基礎的な研究を必要としている。

本論文は、低温および高温超伝導薄膜デバイス中の磁束量子運動を直接磁束検出法を用いて検出し、その磁束ノイズ特性を解析して磁束量子ダイナミクスを明らかにすることを第一の目的とし、さらに高温 SQUID 磁束計の低雑音化に必要な知見を得ることを第二の目的として実験的検討を行ったものである。直接磁束検出法は、磁束量子運動による磁束のゆらぎを SQUID と磁気結合した超伝導検出コイルによって直接検出し、その時間特性を解析する方法である。本研究における主な成果は以下の点に要約される。

直接磁束検出法における磁束ゆらぎ検出の原理は、第二種超伝導体中の磁束量子一個の作る磁界が、超伝導体が十分大きい場合、超伝導体表面近傍で磁気単磁荷 (磁気モノポール) 一個のつくる磁界で近似されるという、モノポール近似に基づいている。モノポール近似を実現するには、測定する薄膜試料と超伝

導検出コイルとの配置に配慮しなければならない。そこで直接磁束検出法による磁束ノイズ測定装置を設計するにあたり、検出コイルに鎖交する磁束の数値計算によるシミュレーションを行い、最適な薄膜試料と検出コイルの配置を決定した。

試作した磁束ノイズ測定装置を用いて、膜質の異なる低温超伝導 Nb 薄膜上に作製した膜厚変化型ブリッジ (VTB) の磁束ノイズ特性の測定を行った。その結果、エピタキシャル成長させた Nb 薄膜上の VTB では臨界電流以上で磁束がいくつかの離散的な値をスイッチするマルチプル・ステップ・ノイズ (MSN) を観測した。MSN の最小ステップ幅は数値計算による磁束量子一個の運動に対応する磁束変化にほぼ一致し、このことからモノポール近似が実現されて磁束ゆらぎが検出されていると結論した。一方、多結晶 Nb 薄膜上に作製した VTB は、エピタキシャル Nb 薄膜 VTB と大きく異なる磁束ノイズ特性を示し、そのステップ幅の分布の解析から、薄膜中に捕獲された多数の磁束量子が臨界電流以上でなだれを生じる可能性を示唆した。

続いて SrTiO₃ (STO) バイクリタル結晶基板上に作製した高温超伝導 YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) 薄膜結晶粒界接合の磁束ノイズ特性を測定し、高温超伝導試料の磁束ノイズ特性が、試料の冷却過程における磁界に敏感に依存することを観察した。異なる磁界中で冷却した試料の磁束ノイズ特性を比較することにより、電流バイアスした粒界接合に隣接した粒界接合が、冷却磁界と冷却過程に依存した低周波のスイッチング・ノイズを示すことを見出した。さらに、直流電圧発生 onset 直下のバイアス電流において高周波パルス列を観測し、その時間波形のステップ幅とバイアス電流依存性から、電流バイアスした粒界接合の電圧状態への移行に伴う磁束ノイズであると推定した。以上の結果から高温超伝導薄膜デバイスがその周辺に弱結合を持つ場合、デバイスの磁束ノイズ特性が冷却環境に大きく依存することが分かった。さらに、低雑音デバイスの開発のためには、弱結合内の磁束量子運動を制御する技術の開発が必要であることを指摘した。

以上を要するに、著者は、生体磁気計測を目的とした高温 SQUID 磁束計の開発において、高温超伝導 SQUID 導入の基礎となる新知見を得たものであり、超伝導電子工学と生体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。