

氏名	柴田 祐輔
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博乙第 2785 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Weak-link Nb-based scanning nano-SQUID microscope system for local magnetic flux imaging (弱結合型ニオブナノ超伝導量子干渉計走査型顕微鏡による局所磁束イメージング)
主査	筑波大学教授 博士(学術) 都倉 康弘
副査	筑波大学教授 理学博士 大塚 洋一
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 池沢 道男
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 野村晋太郎
副査	産業技術総合研究所主席研究員 博士(理学) 柏谷聡

論 文 の 要 旨

超伝導量子干渉計(SQUID)は超高感度磁束検出器として知られているが、既存の SQUID 顕微鏡の多くは空間分解能が $10 \mu\text{m}$ 以上であった。ナノメートル構造試料の物性測定のためにはより空間分解能の高い SQUID 顕微鏡が求められていた。微細化に適した SQUID の構造は平面構造をとる弱結合型 SQUID である。しかしながら、既存の弱結合型 SQUID はその電流-電圧特性にヒステリシスを示すのが通例であった。これは、空間上各点において電流-電圧特性を測定して超伝導臨界電流を求めなければならないため、走査型 SQUID 顕微鏡として使うためには適さないものであった。そこで、本論文では、ヒステリシスを低減させる新規の弱結合型 SQUID 構造を提案し、作製した。SQUID の超伝導材料として、ヘリウム温度 4 K で用いることができ、かつ強磁場に対する耐性のおおきいニオブを用いた。弱結合型 SQUID は集束イオンビーム加工によって作製し、さらに SQUID プロブ先端部を研磨し、測定対象と SQUID との間の距離を削減した。走査型 SQUID 顕微鏡は、水晶振動子を利用した SQUID プロブの高さ制御機構、ピエゾ素子を用いた xyz-3軸微動機構、超伝導磁石を用いて、無冷媒ヘリウムクライオスタット中に構築した。この走査型 SQUID 顕微鏡の性能評価を実施し、幅 $2 \mu\text{m}$ の Nb/Au のストライプの像が得られた。また、SQUID プロブのノイズは最もよいところで $3.1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。新規の弱結合型 SQUID 構造の電流-電圧特性においてヒステリシスは実用上問題ない程度までに低減された。その結果、新規の弱結合型 SQUID プロブは定電流バイアスのもとで磁束-電圧変換素子として用いることが可能となった。

以上の新規開発された走査型 SQUID 顕微鏡を用いて、二次元電子ガス中の電流密度ベクトルの分布に関する研究が実施された。GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ接合ホールバー構造中の電流密度分布のつくる磁場を走査型 SQUID 顕微鏡を用いて観測した。ホールバーの形状に従って流れる電流のつくる磁場分

布が測定された。電流分布が二次元面内に束縛されていることを仮定して、フーリエ解析により測定で得られた磁場分布から電流密度ベクトル分布を再現した。得られた結果は、等方的二次元伝導体を仮定したモデル計算で得られる電流密度ベクトル分布と比較、検討された。その結果、多くの特徴について両者の良い一致が見られたが、一部、明確な差異が見られた。これはモデル計算で取り入れられていない二次元電子の弾道的運動によるものと結論付けられた。

次に、タングステンカーバイドの超伝導特性についての研究が走査型 SQUID 顕微鏡を用いて実施された。タングステンカーバイド薄膜は集束イオンビーム化学的堆積法によって直接ナノ微細構造を堆積することが可能であるという特徴を持つ。そのため、これはジョセフソン素子や SQUID 素子の作製法としての可能性が探られている。しかしながら、タングステンカーバイド薄膜の超伝導特性は素子作製に供するには十分明らかではない状況であった。そこで、外部磁場を印加したタングステンカーバイドの周辺の磁場分布の走査型 SQUID 顕微鏡を用いた測定が行われた。ロンドン方程式を解いて得られたモデル計算による磁場分布との比較を行い、タングステンカーバイド薄膜に渦糸が侵入していることが示唆された。また、タングステンカーバイド膜に電流を流し、その周りの磁束分布を測定することにより、タングステンカーバイド膜中の電流密度分布を得た。その結果、設計された意図した範囲に電流が分布していることが明らかにされた。

以上により、新規開発された走査型 SQUID 顕微鏡は半導体や超伝導ナノ構造素子の評価のために十分な性能を有し、それらの研究において今後、大きな役割を果たすであろうと結論付けられた。

審 査 の 要 旨

本論文は、ニオブ弱結合型超伝導量子干渉計(SQUID)を用いた走査型 SQUID 顕微鏡を開発し、その性能評価を行い、二次元電子ガス中の電流密度ベクトルの分布とタングステンカーバイドの超伝導特性についての行った研究をまとめたものである。従来、ナノサイズの SQUID の研究例はあまりなく、また、微細化に適した弱結合型 SQUID はヒステリシスを有するため走査型 SQUID 顕微鏡としての用途には必ずしも適さないものであった。本研究では、ユニークな構造の弱結合型 SQUID 構造を作製することにより、実用上問題ない程度にヒステリシスを低減することに成功した。その結果、弱結合型 SQUID プローブは定電流バイアスのもとで磁束-電圧変換素子として用いることが可能となった。このことは走査型 SQUID 顕微鏡の測定時間を格段に縮小する効果がある。さらに SQUID プローブ先端部を研磨し、SQUID-測定対象間の距離を短縮することに成功した。以上のことは、現実的な測定条件下での空間分解能、ノイズ特性を含めたトータルの性能を大きく向上させるものとして高く評価できる。以上の新規開発された走査型 SQUID 顕微鏡を用いて、二次元電子ガス中の電流密度ベクトルの分布の再構成に成功し、タングステンカーバイドの超伝導特性の評価に成功したことは、さらに将来のカイラルもしくはヘリカル超伝導体、量子異常ホール効果、量子スピンホール効果等の研究に貢献するものと考えられる。以上のように、本研究により得られた成果は当該研究分野に大きく寄与するものであり、博士論文として相応しい内容のものであると判断する。

〔結論〕

平成 28 年 1 月 21 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において、審査委員全員の出席のもと、本論文について著者に説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。