

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 12305 号
------	---------------

氏 名 谷口 壮耶

論 文 題 目

磁性薄膜パターンによる超伝導回路の高機能化に関する研究
(Study on increased functionality of superconducting circuits with
ferromagnetic patterns)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	藤巻 朗
委員	名古屋大学	教授	浅野 秀文
委員	名古屋大学	教授	岩田 聡
委員	名古屋大学	准教授	牧原 克典
委員	名古屋大学	准教授	山下 太郎

論文審査の結果の要旨

谷口壮耶君提出の論文「磁性薄膜パターンによる超伝導回路の高機能化に関する研究」は、超伝導回路に強磁性体を導入し、回路内で成立する超伝導巨視的波動関数の位相の量子化条件を制御することを通して、回路が高機能化できることを明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、近年の情報通信技術の発展と消費電力の増大といった課題について述べ、その課題を克服しうる集積回路として超伝導集積回路を挙げて、今後の情報通信技術の発展における位置づけを論じている。そして、超伝導集積回路の半導体集積回路に対する優位性ととも、超伝導回路の実用化に向け残された課題について述べている。課題の中でも、まだ有効な解決策が提示されていない超伝導電力変換素子、あるいは再構成可能回路を具現化するための有効な手段として、磁性体による超伝導巨視的波動関数の位相シフトおよび位相スイッチ技術を取り上げるとともに、本研究の目指す方向性と本研究の目的を論じている。

第2章では、研究対象となるジョセフソン接合の外部磁場応答を含む諸特性、ならびに超伝導回路として現在最も活発に研究されている単一磁束量子回路の動作原理を説明している。また、強磁性体の基本的な性質と、それを超伝導回路に応用した場合に期待される効果について整理している。

第3章では、超伝導巨視的波動関数の位相シフトおよび位相スイッチ技術を具現化するために求められる強磁性体の特性を述べている。具体的な強磁性材料としてPdNi合金薄膜を取り上げ、磁気モーメントの温度変化、キュリー温度など、各種の磁気特性を評価した結果を述べている。また、室温では常磁性である強磁性パターンを磁化する有効な方法として、外部磁場中で冷却する方法を提案した。外部磁場の大きさを変えることで、超伝導回路の動作温度(4K)での残留磁場の大きさと向きを制御できることを示している。加えて、磁化した強磁性パターンを超伝導量子干渉素子近傍に配置することで、残留磁化の強さに比例して、超伝導ループ内の位相が変調することを明らかにした。これは、残留磁化の大きさを制御することで任意の量の位相シフトができることを意味し、向きを反転させれば、位相スイッチとして機能することを示している。

第4章では、強度を固定した残留磁化を利用した電力変換素子、具体的には交流-直流変換回路用の素子を提案するとともに、実験により実証した結果を述べている。直流駆動超伝導集積回路は、電源から見た場合、入力インピーダンスがミリオームオーダーとなり、電流源駆動となる。電流源は負荷に対し大きな出力インピーダンスを持つ。その結果、電源での電力消費が、超伝導集積回路全体での電力消費より大きくなり、超伝導集積回路が低電力性を損なう要因となっていた。電力供給を交流とし、適切なインピーダンス変換を超伝導回路と同じ温度で実現、さらにダイオードのような整流素子があれば、上記の問題は解決できる。そこで、インライン構造のジョセフソン接合を接地面上に作り、さらに磁化した強磁性パターンをその近傍に配置した。これにより、外部磁場のない状況でも、正の臨界電流値と負の臨界電流値の大きさに大きな非対称を発現させることが可能となった。整流素子としての性能を数値解析ならびに実験で検討し、実用上障害とならない程度の電力変換効率を実現した。また、非対称度を制御することで、出力電圧を可変にできることも示している。これらは、超伝導集積回路の実用に向けた課題に解を与えたものとして、重要な知見である。

第5章では、強磁性体の磁化反転を利用した回路機能の切り替えについて述べている。第3章で示された位相スイッチを利用すると、単一磁束量子回路において、情報担体となる磁束量子の伝搬方向を残留磁場の向きによって、制御することができる。この機能を利用すると、素子1つが保有する論理機能の切り替えが可能になるほか、再構成可能回路で使われるルックアップテーブル(LUT)を省スペースで実現できるようになる。本章では、論理積/論理和の切り替えのほか、LUTの実証に成功し、大幅な占有面積の低減化に成功している。また、マトリクス状に配置した強磁性パターンの個々の磁化の向きを、横方向の書込み線と縦方向の書込み線のみで制御可能であることを示した。これはこの手法が、今後、より大規模となった場合でも適用可能であることを意味している。

第6章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では、強磁性パターンによる超伝導位相シフト、位相スイッチを提案し、それらを超伝導回路に適用した場合の性能や機能向上の効果を実験的に明らかにしている。これらの知見は、超伝導回路を実用化するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である谷口壮耶君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。