

報告番号	甲 第 12305 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

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)

氏 名 谷口 壮耶

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、超伝導デジタル回路の高機能化のために、磁性薄膜パターンの導入を試みている。超伝導デジタル回路に導入する磁性薄膜パターンの磁気特性を制御する手法を確立したうえで、超伝導デバイスに対し磁性体を導入し、新機能を持つ素子の作製を行っている。

超伝導デジタル回路は高速動作性と低消費電力性を特徴としており、半導体回路に代わって高性能な計算機、信号処理回路を実現することが期待されている。一般的な超伝導デジタル回路である単一磁束量子回路では、すでにメモリを搭載し任意のプログラムを実行可能なマイクロプロセッサの動作実証がなされるなど、活発な研究がされている。また、高い性能を持つ超伝導センサの信号処理回路や、AD変換器としても実用化がすすめられている。本研究では、超伝導デジタル回路が抱える課題のうち、電源で消費される電力が大きいという課題と、集積度が低くハードウェアの柔軟性が欠如している課題に関して解決を目指した。磁性体による超伝導ダイオードを開発し電源の改良を行ったほか、磁性体を用いて超伝導位相シフタを開発し、集積度を向上させ、再構成可能回路を実現することを提案した。

全体は、以下の6章からなる。

第1章「序論」では、超伝導回路の必要性と、磁性体による超伝導回路が抱える課題の解決手法を示す。まず、近年の計算機需要の急激な増加とそれに伴う消費電力の問題に関して述べる。この課題の解決には消費電力を下げ、単位素子あたりの電力効率を上げる必

要がある。その為の技術として超伝導回路である単一磁束量子回路を挙げ、超伝導回路の発展の歴史と優位性、現在の課題を述べる。また、従来の単一磁束量子回路は電流源を超伝導位相のシフトに用いており、これを磁性体による超伝導位相シフタと置き換えができることを述べる。超伝導回路の集積度と論理的な柔軟性の課題を、超伝導位相シフタを用いた再構成可能回路によって解決することを述べる。その後、超伝導回路が持つ課題のうち、電源での消費電力について説明を行う。単一磁束量子回路は低インピーダンス回路であるため、従来の直流電源による電力供給では、単一磁束量子回路自身が消費する電力に比べ、電源の抵抗において 400 倍もの電力が消費されていることを示す。この課題を、単層交流とトランス、磁性薄膜パターンを用いた超伝導ダイオードによって解決できることを述べる。本章によって本研究の方向性を示した。

第 2 章「超伝導回路と磁性薄膜パターンの物理」では本論文で用いる超伝導回路の動作原理と、磁性体の特徴を述べる。まず、超伝導回路の動作原理として、基本となるジョセフソン接合の特性から始め、超伝導量子干渉計を説明する。その後、デジタル回路である単一磁束量子回路の動作原理を説明する。さらに単一磁束量子回路の設計手法について、本研究で用いるセルベース設計に関して説明する。その後、磁性体の特徴を述べ、それぞれの磁性体の特徴を超伝導回路においてどう利用できるのかを示す。最後に、本研究で用いる磁性体について説明する。超伝導回路は極低温で動作することから、磁気特性を弱めた希釈磁性体が望ましい。そのため、強磁性体 Ni と常磁性体 Pd の合金 PdNi を用いる。

第 3 章「超伝導回路上への磁性薄膜パターンの作製と磁気特性の制御」では、磁性薄膜パターンの作製と、磁気特性の制御に対して述べる。まず本章で用いるジョセフソン接合と超伝導量子干渉計の作製プロセスと、測定手法について説明する。さらに、本研究で用いる PdNi 薄膜パターン加工プロセスについて述べる。PdNi 薄膜は同時スパッタ法によって堆積させる。Ni の堆積レートを制御することで合金の Ni 割合を調整し、磁気特性の制御を行った。11%の Ni 割合となる PdNi 合金を用いることとし、作製した磁性薄膜パターンの磁化曲線・キュリー点の評価を行った。その結果利用する磁性体は極低温で大きな保磁力を持ち、キュリー点が 130K 程度であることを確認した。この保磁力の大きな磁性体の磁化を制御するため、磁場中冷却による磁化手法を提案した。磁場中冷却に用いる外部磁場強度と極低温での磁化強度の依存を調査したところ、両者に関係がみられ、提案する磁場中冷却で磁化強度が制御できることが明らかになった。その後、ジョセフソン接合の近傍に磁性薄膜パターンを形成し、磁束バイアス量の制御を試みた。ジョセフソン接合が受ける磁束バイアス量も冷却中の磁場の強度によって制御が可能である結果が得られた。同様に、磁束量子干渉計の上部配線上に磁性薄膜パターンを形成し、超伝導ループに対する磁束バイアスの効果を検証したところ、磁束バイアス量が制御可能であることが確認された。これらの結果により、任意の磁束バイアス量を超伝導回路に加えることが可能となった。

第 4 章「固定磁束バイアスを利用した交流/直流変換素子の実現」では、電源での消費電

力に関する課題の解決のため、超伝導ダイオードの開発を行ったことについて述べる。まず、超伝導回路の電源に用いるダイオードとして必要な特性を述べる。その上で、利用したグランドプレーンを持つインライン型ジョセフソン接合について説明を行う。グランドプレーンを持つことにより、インライン型ジョセフソン接合の特性に非対称な点が現れる。磁性体を用いて磁束バイアスを加えることによって非対称特性を持つ点に動作点を変更させる。実際に磁性体とグランドプレーンを持つインライン型ジョセフソン接合の作製を行ったところ、臨界電流値の変化率が 44%となる、先行研究と比べても高い非対称特性を持つ超伝導ダイオードの作製に成功した。さらにこの超伝導ダイオードの電流電圧特性を用いた整流手法を解説し、半波整流と全波整流の動作実証を行った。さらに超伝導ダイオードを単一磁束量子回路に接続し、電力の供給を確認した。またブリッジ回路による駆動の場合の変換効率を計算した。変換効率として 49%という従来の直流電源に比べて非常に効率の良い電力供給が可能であることを示した。最後に、超伝導ダイオードを用いて直流電圧の可変制御を行った。本章の結果によって、単一磁束量子回路の電源での消費電力を大きく低減できることを示した。

第 5 章「磁化反転を利用した単一磁束量子回路の機能切り替え」では、単一磁束量子回路の集積度を上げ、論理的な柔軟性を向上させるために、磁性体を用いた超伝導位相シフタによって単一磁束量子回路の論理機能の切り替えを行ったことを述べる。まず、単一磁束量子回路の評価手法について述べる。その後論理セルに磁性体を導入し、AND 動作と OR 動作を切り替えることが可能な論理セルを設計・試作し、論理動作の切り替えに成功した。次に、再構成可能回路の重要な要素回路であるルックアップテーブルに着目し、二線式論理、クロック同期式論理の二つの論理手法で実現を行った。まず、二線式論理で用いるデマルチプレクサ回路を設計・試作し、正常動作を確認した。さらに二線式論理のコンパクトなデコーダと合わせることでルックアップテーブルとし、任意の真理値表が表現可能なルックアップテーブルの動作実証を行った。続けて同期式回路に関しても設計・試作を行い、動作実証に成功し、最大で 52GHz での高速度動作を確認した。ルックアップテーブルは大規模化を行い、四入力出力ルックアップテーブルの設計を行った。最後に、機能切り替え回路の大規模化を行った場合に問題が起きると考えられる、磁化の個別制御に関する手法の提案を行った。これまでは電流線を各磁性体に一本ずつ配置し磁化させていたのに対し、提案手法では電流線アレイを用い配線数の低減が可能となる。その結果磁性体に半選択状態が発生することになるため、半選択が起きた場合の磁化の変化を調査した。AND・OR 機能切り替えセルを用い、半選択が行われた場合を模擬した磁場を印加した。半選択による動作マージンの変化を調べたところ、動作マージンの変化が確認されたものの、依然として機能切り替え領域が存在し、提案手法が利用できることを示した。本手法は大規模化に向けて有効であるという結果が得られた。

第 6 章では本論文の総括を述べる。本研究では PdNi 合金を用いた磁性薄膜パターンを超伝導デジタル回路に導入し、超伝導ダイオードの実現と超伝導位相シフタによる機能切り

替え可能回路の動作実証という結果を得た。まだ超伝導ダイオードに関しては大電流化という課題があり、再構成可能回路に関しては多入力化、集積化という課題がある。しかし、超伝導ダイオードの開発、超伝導位相シフタによる再構成可能回路の実現という、超伝導回路技術の発展に対して大きな貢献を行うことができた。