

|      |             |
|------|-------------|
| 報告番号 | 甲 第 11904 号 |
|------|-------------|

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 超伝導回路における磁性体導入の効果に関する研究  
(Study on effects of ferromagnets introduced into superconducting circuits)

氏 名 伊藤 大

## 論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、超伝導集積回路の柔軟性の向上、高機能化、高密度化、低消費電力化に向けて、超伝導デバイス・回路に積極的に磁性体の導入を試みている。磁性体を導入した超伝導デバイス・回路における磁気的特性の発現形態とその素子特性や回路動作への影響について評価するとともに、磁性体と超伝導体を組み合わせた集積回路のポテンシャルを示すことを目的としている。

超伝導集積回路は、高速性と低消費電力性を特長としており、日米を中心に活発な研究開発が進められている。Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合を利用した集積回路では、メモリに搭載したプログラムが実行可能なマイクロプロセッサが実証されるなど、実用化に向け着実に歩を進めている。しかしながら超伝導集積回路は冷却を必要とする。現在は、冷却に関わる消費電力が相対的に小さくなる大規模な応用、すなわちスーパーコンピュータやデータセンタを目指した研究が進められている。もしより高い柔軟性や機能性、あるいは高密度性や低消費電力性を超伝導回路に持たせることができれば、その適用範囲は格段に広がる。そこで、本研究では、強磁性体の導入を試みた。強磁性体の持つ高い比透磁率、保持力、磁化反転、さらには超伝導電子に対する交換相互作用を利用すると、従来の超伝導回路では実現し得ない効果が期待できる。見方を変えると、磁性体の各種特性は超伝導の巨視的波動関数の位相を操作していることと等価である。したがって、本研究は磁性体による位相エンジニアリングに関する研究ともいえる。

全体は、以下の6章から成る。

第1章では、まず、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、現状における課題を述べる。その課題を解決する有力な手段として、磁性体による位相エンジニアリング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る。

第 2 章では、主な超伝導集積回路として磁束量子パラメトロン回路を挙げ、その動作原理を説明する。加えて、磁性体による超伝導位相エンジニアリングが、回路の柔軟性向上・高機能化、面積の低減化、低消費電力化にどのように寄与する可能性があるかを述べるとともに、導入に当たっての課題を整理する。

第 3 章では、磁性体による超伝導位相エンジニアリングの準備段階として、磁性ナノ粒子  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  が超伝導量子干渉計に与える影響を議論する。磁性ナノ粒子は溶液の塗布という形で薄膜を形成できる。成膜装置が不要な上、パターン形成時に超伝導回路への熱的ダメージが発生しないことから、超伝導デバイスへの磁性体の適用効果を評価するために効果的であると考えた。実際に磁性体を導入した結果、5 nm といった粒径の小さなナノ粒子を適用したものは、磁性体の高透磁率による超伝導量子干渉計の最大 20% のインダクタンスの増加が観察され、膜厚に応じてインダクタンスの増加量を制御できることを示した。また、50 nm の粒径の大きなナノ粒子では残留磁化が超伝導量子干渉計の外部磁場特性のシフトという形で観察された。これは、超伝導位相にオフセットを加えるという位相エンジニアリングの効果の 1 つを実証したこととなる。超伝導量子干渉計は、すべての超伝導回路の基礎となっていることから、この結果は、磁性体により超伝導回路に新たな機能が付与できることを示している。一方で、ナノ粒子によるパターンでは、磁性パターン形成の制御性が低いことが課題となった。

第 4 章では、磁性パターン形成の制御性に課題のあった磁性ナノ粒子に対し、制御性の良い磁性体薄膜を検討し、PdNi 磁性合金薄膜の適用を決定した。それを用い、磁性体の残留磁化と磁化反転を利用したこれまでにない機能を持つ超伝導回路を提案した。研究では、まず、PdNi 磁性パターンの基礎的な磁気特性について評価を行った。この磁気特性に基づき、残留磁化を利用し、磁束量子パラメトロンの駆動に必要な励起電流における DC オフセットの低減化を試みた。磁化の大きさの制御で DC オフセットが不要となることを示した。さらに、磁化反転の機能を用いて AND 論理と OR 論理の機能切り替え回路を実証した。これは、回路の柔軟性や機能の向上に寄与する。

第 5 章では、前章までに示した機能向上をより単純な構造で実現しうる磁性ジョセフソン接合について、作製の検討と特性の評価を行った。接合特性が磁性層での交換相互作用の強さと膜厚によって急激な変化することから、集積回路応用上の検討課題を整理した。動作速度などを考慮し、PdNi を磁性層として利用した Nb/PdNi/ $\text{AlO}_x$ /Nb ジョセフソン接合を提案し、この電氣的、磁氣的特性の PdNi の膜厚による変化を評価した。集積回路応用に重要となる臨界電流のばらつきについて、 $1\sigma < 2\%$  が求められることを示したうえで、位相

差シフトのない通常のジョセフソン接合、初期位相差が $\pi$ だけシフトした $\pi$ ジョセフソン接合を磁性層の制御により作り分け、どちらの場合でも特性ばらつきが小さい、すなわち面内均一性良く磁性ジョセフソン接合を得ることに成功した。

第 6 章では、本論文の総括を述べた。本研究では、磁性体として  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子と PdNi 薄膜のパターンを用い、これらの材料を超伝導回路に配置することで超伝導回路に新たな機能を付与でき、実際に回路を高機能化できることを世界で初めて示した。また、さらに高い機能性を実現し得る磁性ジョセフソン接合を取り上げ、0 シフトジョセフソン接合と $\pi$ ジョセフソン接合の作り分けや集積回路に利用可能な高い面内均一性を持つことを示した。磁性パターンについては、複数個の磁性パターンを適用する際の各パターンの磁気特性の個別制御について、磁性ジョセフソン接合については、より微細なデバイスを作製した際の均一性などについて検討すべき課題があるものの、磁性を用いた超伝導位相エンジニアリングの発展に向け、基礎と応用の両面から重要な知見を得ることができた。