

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 長谷川 晴弘

本論文は「酸化超電導量子磁束パラメトロン素子の研究」と題し、酸化超電導体を用いて論理素子を作製して酸化超電導体を超電導エレクトロニクス分野へ応用することを目指して行った研究をまとめたものである。論理素子動作のために必要な回路素子のパラメータ条件をシミュレーションより求めると共に、ジョセフソン接合、インダクタ等の回路素子を作製して特性を評価し、その結果に基づき論理素子を設計、作製し、基本動作を確認することを試みたもので、8章により構成されている。

第1章は「序論」であり、本研究の背景と目的、および本論文の概要について述べている。

第2章は「量子磁束パラメトロン (QFP) 素子」と題し、本研究で検討する論理素子である QFP (Quantum Flux Parametron) の動作原理、素子動作のために必要な回路素子のパラメータ条件をまとめ、特に QFP ループインダクタンス L とジョセフソン接合の臨界電流 I_c の積である LI_c 積を $\Phi_0/2$ (Φ_0 : 磁束量子) 以下に設定しなければならないことを示している。さらに、他の超電導素子や半導体素子と特徴を比較し、QFP に固有の問題点を挙げると共に、QFP を用いて論理積、論理和等の論理ゲートを構成する方法について述べている。

第3章は「ジョセフソン接合」と題し、ステップエッジ型接合とバイクリスタル型接合を取り挙げ、作製法と特性の評価結果について述べている。ステップエッジ型接合では、ジョセフソン特性を得るために急峻なステップを形成しなければならないことを示し、このためにレジスト/Si の二層マスク法を用いて、実際に角度 60° の急峻なステップを形成している。さらに、断面 TEM 観察から YBaCuO 膜に粒界が形成されていることを確認し、電気特性の測定から RSJ モデルに従う電流電圧特性、シャピロステップ、磁場変調特性を得、ジョセフソン接合が形成されていることを確認している。同様に、バイクリスタル型接合についてもジョセフソン接合が形成されていることを確認している。また、これより QFP の設計に必要なジョセフソン接合のパラメータを得ている。

第4章は「インダクタ」と題し、超電導線路のインダクタンスを実験及び計算から評価している。YBaCuO 一層構成の直接結合型 dc-SQUID を作製し、SQUID 電圧-制御電流特性からインダクタンスを測定し、インダクタンスの温度依存性と線幅依存性を求め、これより QFP の設計に必要なインダクタンスを得ている。またインダクタンスをマグネティックインダクタンスとカイネティックインダクタンスの各成分に分けて計算し、測定結果と計算結果を比較することにより、測定値はマグネティックインダクタンスとカイネティックインダクタンスの和として求めた計算値にほぼ一致することを示している。また、これより温度上昇または細線化によりカイネティック成分の寄与が増大すること、磁気結合型の読み出し SQUID の感度やグランドプレーンのインダクタンス低減効果は減少することを指摘し、素子の高温動作や微細な素子作製に必要な設計指針を得ている。

第5章は「信号読み出し素子」と題し、磁気結合型 SQUID を取り挙げている。制御線と SQUID ループとの相互インダクタンスを種々の線間隔について求め、読み出し素子としての性能を評価し、QFP の設計に必要な条件を得ている。

第6章は「QFP の基本動作」と題し、上記のように特性を評価した回路素子を用い、層構成、接合、読み出し素子により三種類の QFP を作製している。第一は YBaCuO 一層構成、ステップエッジ型接合、磁気結合型読み出し SQUID を用いたもの、第二は Au/SrTiO₂/YBaCuO 構成、バ

イクリスタル型接合、磁気結合型読み出し SQUID を用いたもの、第三は Au/SrTiO/YBaCuO 構成、バイクリスタル型接合、サンプリング接合を用いたものである。磁気結合型 SQUID は入出力分離が良いという特徴を有する一方、信号電流の検出感度が低いという欠点を有することを示し、磁気結合型 SQUID 以外の方法としてサンプリング接合を検討している。サンプリング接合は信号電流を接合に注入するため、感度良く信号電流を検出できるが、一方、入出力分離が不十分であり素子動作が影響を受けるという問題を指摘し、サンプリング接合を付加した QFP について動作モードを計算し、QFP 動作に必要なパラメータ条件を求めている。第一、第二、第三いずれの QFP についてもクロック信号によって入力信号に応じた出力信号を得るといった基本動作を確認すると共に、シミュレーション結果に対応した動作波形を得ている。

第7章は「MUX の作製」と題し、複数の QFP からなる論理ゲートの一例として、二つの QFP とサンプリング接合からなる 2:1 MUX (multiplexer) を作製している。回路規模を大きくするためには、複数の QFP を縦列に接続しなければならないことを示し、このため、負荷インダクタを QFP ループの外側に取り出しながら、出力電流を大きくできるように負荷インダクタンスの小さい素子構成を検討している。測定の結果、選択信号により二つの QFP に入力した二つの入力信号のいずれか一方を選んで出力できることを確認し、これより温度 6.5K における MUX の基本動作を確認している。

第8章は「結論」であり、本研究の成果を要約して述べている。

以上を要するに本論文は酸化物超電導体を用いて、回路素子であるジョセフソン接合、インダクタ、信号読み出し素子を作製し、特性を評価すると共に、その結果に基づき論理素子である量子磁束パラメトロン (QFP) 素子を作製し、基本動作を確認したものであり、超電導エレクトロニクスの分野へ貢献するところ大である。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。