

超伝導デバイス応用ラボ

(Superconductivity Device Applications Lab.)

研究項目及び研究期間

磁束量子の運動を利用する超高速集積回路の研究 (平成9年度～14年度)

単一磁束量子回路と外部回路とのインターフェイス技術の研究 (平成9年度～11年度)

単一磁束量子回路を用いた広帯域型アナログ-デジタル変換器の研究 (平成12年度～13年度)

1. 研究の背景

単一磁束量子 (Single Flux Quantum) を情報担体として動作するデジタル回路 (SFQ 回路) の研究が1990年代半ばから米国において活発に行われるようになった。その理由は、SFQ回路が、数10GHzから数100GHzのクロック周波数において動作させることができ、消費電力が極めて小さいことにある。米国では、SFQ回路を利用した様々なタイプのADコンバータ、DAコンバータなどの開発が行われているほか、1998年にはベタフロップス級コンピュータの実現を目指す国家プロジェクトの中でSFQ回路をベースとする超伝導プロセスの研究が開始された。

このような背景の元に、1997年度より始められた特別研究「サブピコ秒デバイス技術に関する研究」の1テーマとして「磁束量子の運動を利用する超高速集積回路の研究」を開始した。この研究の目的は、SFQ回路の超高速スイッチング特性を利用し、実用的応用が可能なデバイスを開発することにある。具体的には交流電圧標準及び半導体AD・DAコンバータの校正への応用が期待されるSFQ-DAコンバータを開発することを目標とした。また、同年度に開始された科学技術庁の総合研究「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能の研究」に参加し、「単一磁束量子回路と外部回路とのインターフェイス技術の研究」を開始した。このテーマにおいては、SFQ回路の大規模集積を図る上で不可欠なチップ間におけるSFQパルス的高速伝送技術を開発することを目標とした。

2. 研究経過と現状

SFQ回路に関する研究を開始してまず行ったことは、SFQ回路を設計、作製、評価するための環境作りである。

SFQ回路の設計環境は、ニューヨーク州立大学 (SUNY) で使用されているものと同じシステムを採用した。すなわち、回路の動作マージンを最大化するための回路パラメータの決定は、汎用の回路設計支援ソフトウェア CADENCEをプラットフォームとして動作するPSCAN/COWBOYプログラムによって行っている。また、回路レイアウトの作成はインダクタンス抽出プログラム LMETERを用いて行っている。SFQ回路の作製は、Nb/AIOx/Nb接合をベースとする超伝導集積回路作製プロセスによって行っている。そこでは、接合の臨界電流密度と最小寸法は、それぞれ、 1.6kA/cm^2 と $2.8\mu\text{m}\times 2.8\mu\text{m}$ に設定されている。また、抵抗としては 1.2Ω のシート抵抗値をもつPd膜が採用されている。SFQ回路の低クロック周波数での評価はSUNYにおいて開発された低速機能試験プログラム、独自に試作した低温プローブ、非磁性チップキャリアなどを用いて行っている。また、GHzオーダのクロック周波数での機能試験を行うための環境整備を現在進めている。

SFQ-DAコンバータの開発については、すでに3つの要素回路 (パルス数増倍回路、パルス分配回路、電圧増幅回路) の低速機能試験を終了し、現在最初のプロトタイプモデルである4ビットDAコンバータの試作及び機能試験を進めており、8ビットDAコンバータの設計にも着手している。

チップ間におけるSFQパルスの伝送技術の開発に関しては、従来技術の問題点を克服する新しい方法を提案し、これまでに実験的な証明を行った。従来、チップ間においてSFQパルスを伝送するために、超伝導ストリップ線路を形成した基板の上に複数のチップをフリップチップボンディングによって圧着し、SFQパルスを送り出す側のチップ上にインピーダンスマッチング用の多段のジョセフソン接合あるいは多段のSQUIDを設け、受け手側のチップ上に信号増幅用の

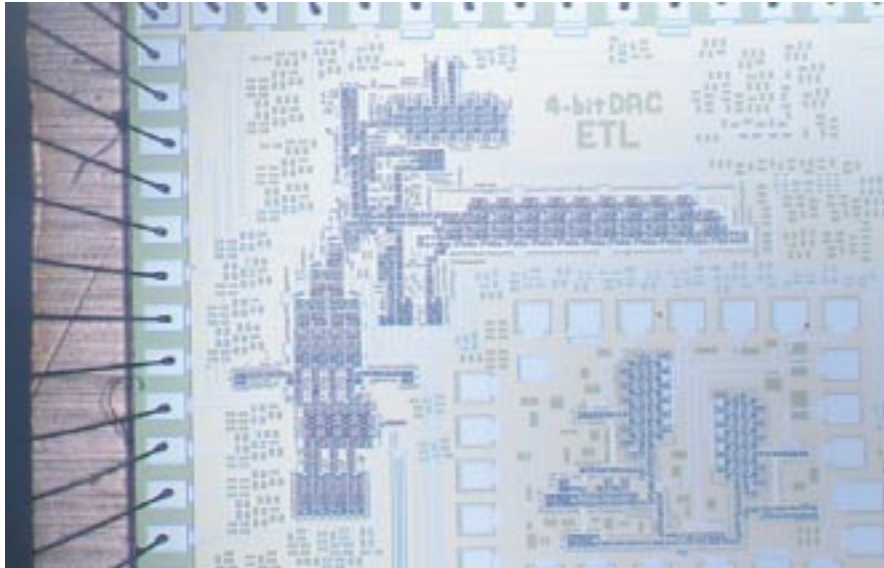


図1 4ビットSFQ-DAコンバータ

ジョセフソン伝送線路を設ける方法が提案されていた。しかし、この方法では十分な動作マージンが得られず、実験的な証明は行われていなかった。これを解決するために、基板上にもジョセフソン接合を含む回路を集積する“能動マルチチップモジュール(能動MCM)方式”を提案した。この方式によれば、チップ間におけるSFQパルスの伝送が大きな動作マージンを伴って可能になる。実際に、テストMCMを作製し特性を評価した結果、SFQパルスの伝送が正常に行われていることが確認された。

3. 波及効果

SFQ回路を用いたDAコンバータの開発は、現在特別に設計された熱電対を用いて行われている交流電圧標準の精度を飛躍的に高めるものとして期待されている。また、今回新たに提案し有効性が実証されたチップ間におけるSFQパルス伝送技術は、ペタフロップス級コンピュータ用超伝導プロセッサの開発などにおいて不可欠であるばかりでなく、大きな内部メモリを有するADコンバータの開発などにおいても重要な役割を果たすことが期待されている。

4. 今後の研究展開の方向

現在超伝導デバイス応用ラボにおいて実施されている研究テーマは全て、2001年4月以降新法人のエレ

クトロニクス領域に引き継がれ実施される予定である。SFQ-DAコンバータについては、最終的におよそ2万個のジョセフソン接合を含む12ビットDAコンバータを開発し、それを独自に考案した交直変換システムに適用して性能評価試験を行う。技術課題としては、1)高い歩留まりと高い再現性を有するSFQ回路作製プロセスの確立、2)SFQ-DAコンバータの出力と既存の電圧標準システムの出力とを比較する方法の開発、及び3)SFQ-DAコンバータを用いた交直変換システムの開発が挙げられる。

科学技術庁の総合研究「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能の研究」は、1999年度において第I期の研究を終了し、2000年度と2001年度において第II期の研究が実施される。第II期のテーマとして、SFQ回路を用いた広帯域型ADコンバータの研究を実施する。その理由は、電波分光による地球大気中あるいは宇宙空間に存在する微量分子密度の観測において、帯域が4GHzを越えるADコンバータの開発が観測時間の短縮化を計る上で強く望まれており、SFQ-ADコンバータを用いることによってその早期の実現が見込まれるためである。これまでにすでに、ADコンバータ全体の概念設計と要素回路の設計を終了し、現在、要素回路の試作とGHzオーダのクロック周波数を用いる高速機能試験を行うための準備を行っている。技術課題としては、1)SFQ-ADコンバータの高速動作試験法の確立及び2)SFQ-ADコンバータを電波分光システムに応用するための実装技術の開発が挙げられる。

なお、超伝導デバイス応用ラボでは、SFQ回路の研究の他に分布定数型ジョセフソン接合内における磁束量子の運動と電磁波との共振現象を利用したサブミリ波発振器の開発、さらに、SNS型ジョセフソン接合を用いたプログラマブル電圧標準用DAコンバータの開発を行っており、これらの研究についても2001年4月以降エレクトロニクス領域において実施される予定である。特に後者については、米国のNational Institutes of Standards and Technologyのグループと現在実質的な共同研究を進めており、法人化以降も継続される予定である。

当該研究担当者等

1) ラボ構成員(総数7名)

職員(7名) 東海林彰*、佐々木仁、神代 暁、前澤正明、山森弘毅(電子デバイス部)、鈴木基史(情報アーキテクチャー部)、菊池恒男(基礎計測部)

2) その他の研究協力者

桐生昭吾、平山文紀(基礎計測部)

* ラボリーダー