

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成15年度採択研究代表者

蔡 兆申

(NEC基礎・環境研究所 主席研究員)

「超伝導量子ビットシステムの研究開発」

1. 研究実施の概要

量子コンピュータの実現には、量子ビットの集積化はもとより、その制御、観測を行う周辺回路を含むシステム全体の集積度のスケールアップが必要である。周辺回路には高速、低ノイズ、低電力消費の集積回路技術が必要であり、この研究では単一量子磁束 (SFQ) 超伝導エレクトロニクスを集積回路を使った周辺回路と超伝導量子ビットを組み合わせた新しい技術の可能性を探求することが目的である。このプロジェクトでは、この二つの技術を現実的に融合する筋道を探求し、その基礎的評価を行う計画である。

本年度はシステム実装にマルチチップモジュール方式を採用し、実際にその試作をフリップチップボンディング技術を使って行い、チップ間の60GHzの高速信号伝達を実験的に確認した。希釈冷凍機温度でのSFQ回路動作のために、新たなパラジウム抵抗の試作を行い、パラジウムが量子ビット動作温度においても安定な抵抗材料として利用できることを実験的に確認した。SFQ回路の消費電力の低減のため、オンチップバイアス電流供給回路を微小抵抗とインダクタンスの直列回路で構成する方法 (LRロード法) を提案し、SFQクロックジェネレータならびにSFQカウンタを試作し、この新たな電量供給方式を使いその正常な動作を実験的に確認した。この方式により、現状のSFQ回路の消費電力を二十分の一程度に引き下げられる。

SFQ回路による量子ビット制御を考え、立ち上がり立ち下がり時間が10ピコ秒程度の速さで行える高速なマイクロ波チョッパを設計試作し、その実験を行った。これはジョセフソン接合の直列アレイで構成されるマイクロ波伝送線路において、ジョセフソン接合に印加するバイアス電流を変化させることで伝送線路のインピーダンスを変化させ、マイクロ波の反射を制御するものである。試作したジョセフソンマイクロ波チョッパで、DC制御電流の入力に対してマイクロ波の減衰特性を得た。また量子ビットを制御するための制御信号生成超電導電圧ドライバの開発をおこなった。SFQ量子ビット制御用の電圧ドライバの設計と作製を行い、低速での動作実験に成功した。

磁束量子ビットの量子状態によってSFQパルスの伝搬遅延時間に変化し、その差異は数値解析により1ps程度と算出された。この時間差をSFQ回路によるタイミング識別器によって検出すると量子ビットの読み出しができる。今年度は実際にこの識別器を構成し、

0. 7ps以下の時間分解能があることを実証した。

また今年度は磁束量子ビットの試作に成功した。これは4接合を有する対称性のいい磁束量子ビットであり、マイクロ波を照射しラビ振動、ラムゼー振動を観測した。またスピْنَエコーにより、低周波ノイズにより失われたコヒーレンスの情報を回復することができ、デコヒーレンス時間を約2倍の1.2マイクロ秒程度まで増加させることができた。エネルギー緩和時間も同じく1.2マイクロ秒であり、このデコヒーレンスはエネルギー緩和に起因していることがわかった。

2. 研究実施内容

(1) システム構成 — マルチチップモジュール開発

今年度は、SFQ回路を量子ビットの制御に用いるために必要な、以下の要素技術研究開発をおこなった。第一に、量子ビットの動作温度でも使用できる抵抗材料の検討と特性評価をおこなった。抵抗材料として、パラジウムを選定し、作製した薄膜サンプルの電気特性を超低温で測定した。その結果、パラジウムが量子ビット動作温度においても安定な抵抗材料として利用できることを確認した。第二に、量子ビット制御を目指したSFQ-量子ビットハイブリッドモジュールの開発を行った。SFQ-量子ビットハイブリッドモジュールをフリップチップ型のマルチチップモジュールとして開発し、チップと基盤を接続する超伝導バンプの作製技術の研究をおこなった。その結果、帯域として60Gbpsの信号伝送が可能なレベルであることを確認した。第三に、SFQ回路の電力消費の問題の解決法を探った。SFQ回路の消費電力の低減のため、オンチップバイアス電流供給回路を微小抵抗とインダクタンスの直列回路で構成する方法（LRロード法）を提案し、本方法により既存のSFQ回路の消費電力を約20分の1に減少出来ることを示した。主要なSFQ論理ゲートについて、LRロード法による低消費電力化を行った結果、全ての回路が十分な動作マージンで動作することを検証した。またクロックジェネレータならびにカウンタをLRロード法により設計、試作し、これらの高速回路動作を実証した。

チップ上の発熱は低減しても、熱を効率的に基盤等にうまく逃がす必要があるが、実際にはチップからの熱伝導が何らかの障害を受けて、チップが発熱する現象が観測されている。しかしこのようなマルチチップ構成のシステムでは、たとえSFQチップの温度が環境温度よりも高くなっても、量子ビットチップは特に発熱の影響を受けにくい構造になっている。

以上により超伝導量子ビットに対する入出力を単一磁束量子（SFQ）回路で行うシステムにおいて、SFQ回路-量子ビットの実装方法と超低温動作が可能な抵抗材料にめどがついた。今後は、モジュールの伝送特性の改善、抵抗体やジョセフソン接合などの作製条件最適化研究を行い、異なるチップに形成したSFQ回路と量子ビットの連結を目指す。また、異なる動作原理を持つ量子ビットの制御のために、それぞれ最適な制御回路の研究をおこなう。

(2) SFQ回路による量子ビット制御

超伝導量子ビットの正確な状態操作のために、立ち上がり立ち下がり時間が10ピコ秒程度の速さで行える高速なマイクロ波チョッパの検討を行った。ジョセフソン接合の直列アレイで構成されるマイクロ波伝送線路において、ジョセフソン接合に印加するバイアス電流を変化させることで伝送線路のインピーダンスを変化させ、これによりマイクロ波のオンオフを行うジョセフソンマイクロ波チョッパの提案を行った。シミュレーションにより、10GHz程度のマイクロ波入力に対して、高速なマイクロ波のチョッピングが可能であることを示した。また、実際にジョセフソンマイクロ波チョッパを試作し、DC制御電流の入力に対してマイクロ波の減衰特性を得た。

超伝導量子ビットの状態を正確に観測するためには、観測以前に量子ビットの状態に影響を及ぼさないこと、短時間に観測が完了できること、1回の観測で状態を確定することが必要である。これらの観測を極低温下に集積化されたSFQ回路を用いて、高速かつ高精度に行う方法について他のグループとも協力しながら検討を進めた。

また量子ビットを制御するための制御信号生成超電導電圧ドライバの開発をおこなった。SFQ量子ビット制御用の電圧ドライバの設計と作製を行い、低速での動作実験に成功した。

(3) SFQ回路による量子ビット読み出し

超伝導を利用した量子ビットの中で磁束量子ビットがSFQ回路ともっとも整合性が高い。その磁束量子ビットの量子状態の読み出しには量子状態を反映した1 μ A程度の電流を、上記条件を満たしつつ検出する必要がある。そこで、磁束量子ビットと弱く磁氣的に結合する検出回路を構成し、量子状態の読出しの際にのみSFQパルスを遠方から送り込む方法を考えた。量子状態によってSFQパルスの伝搬遅延時間に変化し、その差異は数値解析により1ps程度と算出された。この時間差をSFQ回路によるタイミング識別器によって検出するのが今回の提案である。今年度は実際にこの識別器を構成し、0.7ps以下の時間分解能があることを実証した。しかしながら、同時にSFQパルスの遅延時間に2ps程度の幅（ジッタ）があることも分かり、この原因の究明が今後の課題となる

(4) 磁束量子ビット

超伝導量子ビットは上記の電荷量子ビット以外にも、数種のジョセフソン量子ビットが既に実験的に検証されている。現時点ではどの量子ビットの将来性が高いか、現在のところまだ完全に見極められていない。また現状の電荷量子ビットの性能は決して満足のいくものではない。このような状況で我々は、電荷量子ビット以外にも磁束量子ビットの実験を立ち上げてきた。

今回試作に成功した磁束量子ビットは、4接合を有する対称性のいい磁束量子ビットであり、読み出しのためのスイッチング型SQUIDが直結している設計である。この素子での量子振動実験に成功した。マイクロ波を照射シラビ振動観測し、振動周波数がマイクロ波の振幅に比例して早くなることも確認した。ラムゼー振動により、デコヒーレンス時間は約0.5マイクロ秒と評価された。これは素子を「0」と「1」の縮退点にバイ

アスしたときの値で、この点から外れると背景ノイズの影響を受けやすくなり、デコヒーレンス時間はすぐに短くなる。またスピンエコーにより、低周波ノイズにより失われたコヒーレンスの情報を回復することができ、デコヒーレンス時間を約2倍の1.2マイクロ秒程度まで増加させることができた。このデコヒーレンスはエネルギー緩和に起因していることがわかった。エネルギー緩和時間も同じく1.2マイクロ秒であった。このようなエネルギー緩和は、素子環境においての背景磁束ノイズによるものと見られている。

3. 研究実施体制

NECグループ

- ① 研究分担グループ長：中村泰信（NEC基礎・環境研究所、主任研究員）
- ② 研究項目：量子ビットシステムの研究
 - 量子ビット間の相互作用をオフすることの可能な集積方法の研究
 - 量子ビットとSFQ回路の実装方法の検討
 - 磁束量子ビットの読出しをSFQ回路を用いて行なう方法の検討
 - 磁束量子ビットのコヒーレンス時間増大のための検討
 - Nb系微小ジョセフソン接合作製技術の開発

ISTECグループ

- ① 研究分担グループ長：日高睦夫（ISTEC超電導工学研究所デバイス研究開発部低温デバイス開発室、室長）
- ② 研究項目：量子ビットインターフェイスシステムの研究
 - SFQインターフェイス回路試作の検討と準備
 - フリップチップボンディングの3次元シミュレーション
 - SFQインターフェイス回路低電力化のための接合微細化検討

横浜国立大学グループ

- ① 研究分担グループ長：吉川信行（横浜国立大学大学院工学研究院、教授）
- ② 研究項目：SFQによる量子ビットの操作
 - 量子ビット操作用SFQ高速パルス回路の研究
 - 量子ビット操作用超伝導マイクロ波パルス発生回路の研究
 - SFQインターフェイス回路低電力電流供給方式の研究

名古屋大学グループ

- ① 研究分担グループ長：藤巻 朗（名古屋大学大学院工学研究科 量子工学専攻、教授）
- ② 研究項目：SFQによる量子ビットの高速、高精度観測
 - 量子ビット観測用SFQ回路方式の研究

- SFQパルス遅延時間のT/D変換器をベース計測手法の研究

SUNYグループ

- ① 研究分担グループ長：アベリン、デミトリ・V（ニューヨーク州立大学ストーニブルック校、物理天文学部、教授）
- ② 研究項目：電荷/位相量子ビットと複数量子ビット回路のディフェージング
 - SFQ回路を使った電荷/位相量子ビットの量子限界読み出し法の理論的研究
 - デコヒーレンス効果の理論的解析

東京大学グループ

- ① 研究分担グループ長：加藤岳生（東京大学 物性研究所、助教授）
- ② 研究項目：量子ビットの制御・観測に関する理論的評価
 - デコヒーレンスの抑制のために最適な実験パラメータの理論的評価

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

- Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
"Quantum Noise in the Josephson Charge Qubit"
Physical Review Letters, 93, 267007, 2004
- Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
"Single-shot measurement of the Josephson charge qubit"
Physical Review B 69, 180507, 2004
- M. Watanabe, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
"Circuit with small-capacitance high-quality Nb Josephson junctions"
Applied Physics Letters, 84, 401, 2004
- Y. Hashimoto, S. Yorozu, and T. Miyazaki,
"Transmission of single-flux-quantum pulse between superconductor chips",
Appl. Phys. Lett. 86, 072502 (2005).
- Hisao Hayakawa, Nobuyuki Yoshikawa, Shinichi Yorozu, Akira Fujimaki
"Superconducting Digital Electronics"
Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 10, pp.1549-1563
October 2004