

「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索し、その基礎的評価を行う計画である。量子ビットの研究では、今年度は量子ビットのデコヒーレンス時間の長期化を目指した研究では、3.5 マイクロ秒のエコー緩和時間を得た。スケールアップ可能な量子ビットの研究においては、新たな可変結合方式として、2 つの量子ビット間の差周波数により第 3 の量子ビットを変調し、結合をパラメトリックに誘起する方法を提案した。

超伝導周辺回路に関しては、量子ビット-SFQ マルチチップモジュールを試作し、SFQ パルスのチップ間 117Gbps 伝送実験に成功した。また希釈冷凍機温度動作を想定した、従来比低臨界電流(従来比:1/7)の接合を用いた SFQ 回路の試作に成功した。マイクロ波発生器として新たに SFQ パルス変換し帯域フィルターによりマイクロ波に再変換する方法について検討を行い、シミュレーションにより立ち上がり 30ps で良好なマイクロ波制御が行なえることを示した。磁束量子ビットの状態を、SFQ パルスの伝搬遅延時間に変換して検出する SFQ 検出回路を提案しているが、これは回路のタイミングジッタ十分低くなくては実現しない。今年度はジッタの定量的評価とその発生原因の特定を試み、量子ビット検出時の低温の環境下では、十分な検出精度を持つという見地を得た。

2. 研究実施内容

(1) 量子ビットの研究:

「磁束量子ビットのデコヒーレンス」

磁束量子ビットのデコヒーレンスに関して、緩和時間のバイアス条件依存性の測定を通じて実験的に調べた。磁束バイアス依存性の測定から、位相緩和は主に磁束の $1/f$ ノイズによって起こるこ

とが明らかになった。また位相緩和が最小となる動作点では、エネルギー緩和がデコヒーレンス時間を与え、3.5 マイクロ秒のエコー緩和時間を得た。一方、量子ビット読み出し用の SQUID 回路から導入されるノイズは、白色に近いものであり、量子ビットのエネルギー緩和時間の測定から約 300 オーム程度のオーミック環境の量子雑音に相当することを見出した。

「磁束量子ビット間の可変結合方式の理論的提案」

2つの磁束量子ビット間の相互作用をもうひとつの磁束量子ビットを介して実現する方法を提案した。媒介となる量子ビットは大きいエネルギーを持ち常に基底状態にあると仮定する。この量子ビットの磁束バイアスを結合される2つの量子ビットの差周波数で変調することにより、2つの量子ビットの結合をパラメトリックに誘起することができる。この方式は、結合される量子ビットを常に位相緩和が最小となるバイアス条件において動作させることができるという利点を持つ。現在この方式の実証実験中である。

「電荷ゆらぎの研究」

前年度の電荷量子ビットのデコヒーレンスの研究から、電荷の $1/f$ 雑音の雑音スペクトラム密度の係数は、 T^2 の温度依存性があると推測した。今年度は超伝導の単電子トランジスタの電荷雑音の温度特性を測定したところ、想定したとおりの温度依存性が実際に観測された。このような結果は、電荷ゆらぎフラクチュエータの微視的なモデルを考える上で重要な意味を持つ。

(2) システム構築に向けた研究

超伝導量子ビットの制御を単一磁束量子 (SFQ) 回路でおこなうシステムの構築に向け、量子ビット制御のための SFQ 回路の研究と、それに必要な量子ビット-SFQ マルチチップモジュール (MCM)の開発を行った。量子ビット制御用 SFQ 回路の研究では、低温動作低 J_c ジョセフソン接合を用いた SFQ 回路の作製、MCM 上および回路中の温度を測定するためのコンパレータ回路の実験、量子ビットドライバ回路の検討を行った。量子ビット-SFQ MCM 研究では、超伝導ハンダバンプなどのフリップチップボンディング法の開発、SFQ パルスのチップ間伝送実験を行った。その結果、従来比 $1/7$ の $J_c=350\text{A}/\text{cm}^2$ の接合を用いた SFQ 回路の試作に成功した。温度測定用のコンパレータ回路を試作し理論通りの動作を確認した。量子ビットドライバ回路として Huffle ゲートを設計しシミュレーションにより 10GHz 動作の見通しを得た。十分な信頼性を有する直径 $15\mu\text{m}$ の MCM 用ハンダバンプの開発を行った。MCM 技術を用いて SFQ パルスのチップ間 117Gbps 伝送実験に成功した。

(3) 量子ビット制御用の超伝導回路の研究

超伝導量子ビットの状態操作を正確により速く行うためには、高速で高精度のパルス発生器とマイクロ波発振器が必要である。SFQ 論理回路を用いて作成した高性能パルス発生器とマイクロ波発振器を超伝導量子ビットと同じ極低温温度環境下で動作させ、その状態を高速に操作する方法

について研究している。

これまでに、SFQ回路を超伝導量子ビットと同じ極低温温度環境下で動作させる際に問題となる発熱の問題を検討し、インダクタンスと微小抵抗からなるバイアス供給回路を用いて、現状のSFQ回路の消費電力を20分の1程度に引き下げる方法を検討してきた。本年度は、本手法を用いて低消費電力型のクロック発生器を試作し、低温環境下における低エラーレートでの高速動作を検証した。今後は、低消費電力型SFQ回路を超伝導量子ビットと同じ温度ステージで動作させ、発熱量と周辺温度の関係、ならびに超伝導量子ビットへの影響について調べる。

また、マイクロ波発信器については、外部マイクロ波を高速にスイッチするチョッパ回路の検討を行っている。チョッパ回路を実現する方法として、Josephsonインダクタンスで構成された可変インピーダンス伝送線路、ならびにマイクロ波をSFQパルス変換し帯域フィルタによりマイクロ波に再変換する方法について検討を行った。前者については試作を行い、実験においてマイクロ波の変調効果を得た。後者については、シミュレーションにより立ち上がり30psで良好なマイクロ波制御が行なえることを示した。今後は、マイクロ波の高速制御性に優れた後者の方法でチョッパを試作し、マイクロ波の変調特性を実験的に評価する。

パルス発生器については、SFQパルスで高速制御が可能なDC駆動型の可変出力パルス発生器を設計、試作し、低速において良好な出力特性を得た。

(4) SFQによる量子ビットの高速・高精度観測

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。本研究グループでは、SFQ回路ともっとも整合性が高い磁束量子ビットの量子状態の読み出しについて、SFQ回路による高速・高精度計測の可能性を追求した。

具体的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。すでに、磁束量子ビットの状態を、SFQパルスの伝搬遅延時間に変換して検出するSFQ検出回路を提案しているが、そこでは0.1ps程度以下の観測精度が要求される。この精度はタイミングジッタによって決まるため、ジッタの定量的評価とその発生原因の特定を試みた。その結果、ジッタは4Kでの通常のSFQ回路パラメータ下で0.09psであり、さらにこれは抵抗値の平方根に反比例したことから熱的なジョンソン雑音がその主原因であることが分かった。量子ビット検出時の更に低温の環境下では、ジョンソン雑音の影響は数fsとなり、十分な検出精度を持つと見込まれる。

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、主席研究員
理化学研究所、非常勤研究員）

②研究項目：

- 集積可能な量子ビットの研究
- 量子ビットのデコヒーレンス長期化に関する研究

ISTEC グループ

①研究分担グループ長：日高 睦夫（超電導工学研究所、部長代理／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高速制御

「横浜国立大学グループ」グループ（SFQによる量子ビットの操作）

①研究分担グループ長：吉川 信行（横浜国立大学、教授）

②研究項目：

- SFQ 回路の低消費電力化と低温動作性能の検討
- SFQ 回路を用いた高速高精度マイクロ波発振器の開発
- SFQ 回路を用いた高速高精度パルス発生器の開発
- SFQ 回路を用いた量子ビットの状態制御の検討

「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、教授）

②研究項目：

- SFQ による量子ビットの高速・高精度観測

SUNY 理論グループ

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ュージング
- 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

SUNY 設計グループ

①研究分担グループ長：セミノフ、ヴァシリ（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：

- 低消費電力 SFQ 回路の研究
- 非破壊量子限界読み出し法の研究

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 物質理論研究部門、
助教授）

②研究項目：

- 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（原著論文）発表

- “*Temperature square dependence of the low frequency $1/f$ charge noise in the Josephson junction qubits*” Accepted to Physical Review Letters O. Astafiev, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, T. Yamamoto, J.S. Tsai
- “*Tunable coupling scheme for flux qubits at the optimal point*” Physical Review B 73, 094506, 2006 Antti O. Niskanen, Yasunobu Nakamura, and Jaw-Shen Tsai
- “*Characterization of ultrasmall all-Nb tunnel junctions with ion gun oxidized barriers*” Applied Physics Letters, 88, 112113, 2006 H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
- “*Controllable Coupling between Flux Qubits*” Physical Review Letters, 96, 067003, 2006 Yu-xi Liu, L. F. Wei, J. S. Tsai, and Franco Nori
- “*Hybridized solid-state qubit in the charge-flux regime*” Physical Review B72, 73, 014510, 2006 J. Q. You, J. S. Tsai, and F. Nori
- “*Coherent manipulation of coupled Josephson charge qubits*” Physica C, Part 2, 426, 2005 Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin, T. Tilma, F. Nori, and J. S. Tsai
- “*Demonstration of chip-to-chip transmission of single-flux-quantum pulses at throughputs beyond 100 Gbps*” Applied Physics Letters Vol.87 pp.022502-1-3 11 July 2005 Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Satoh, and T. Miyazaki
- “*Observation of quantized energy levels in a Josephson junction using SFQ circuits*” IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 15, June 2005, pp. 864-867,. Y. Yamanashi, M. Ito, A. Tagami, N. Yoshikawa
- “*Design and implementation of double oscillator time-to-digital converter using SFQ logic circuits*”, Physica C, vol. 426-431, Part 2, 1 October 2005, pp. 1699-1703. T. Nishigai, M. Ito, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai and S. Yorozu
- “*Design and Implementation of Low-Power SFQ Circuits using LR-load Biasing Technique*”, to be published in Physica C,. T. Nishigai, S. Yamada, N. Yoshikawa
- “*On-chip microwave generator for manipulation of superconductive quantum bits*”, to be published in Physica C. Y. Yamanashi, T. Asano, N. Yoshikawa,

- “超伝導単一磁束量子回路によるマルチビットアナログ-デジタル変換器の提案” 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J88-C, No.7, pp.560-567, 2005. 関谷彰人, 西土佳典, 藤巻朗,
- “*Demonstration of the Multi-Bit Sigma-Delta A/D Converter with the Decimation Filter,*” IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.340-343, 2005. Sekiya, K. Okada, Y. Nishido, A. Fujimaki and H. Hayakawa
- “*High-Resolution Analog-to Digital Converters toward Software-Defined-Radio Receivers,*” IEICE Transactions on Electronics, Vol.E89-C, No.2, pp.113-118, 2006. A. Fujimaki, Y. Nishido and A. Sekiya,
- “*Rapid Ballistic Readout for Flux Qubits*” Physical Review B, 73, 094504, 2006 D.V. Averin, K. Rabenstein and V. S. Semenov