

「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

(日本電気 (株) ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員

(独)理化学研究所 非常勤チームリーダー)

「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

超伝導量子ビット回路と、それをサポートする超伝導の高速・低消費電力周辺回路を融合した、超伝導量子ビットシステムの基礎技術の確立を目指す。既に固体素子では最長の 3 マイクロ秒のデコヒーレンス時間(T2)を達成し、さらに同様な寿命を持つスケラブルで、結合可変な 2 ビットの基本ゲートの動作を初めて実現した。オンオフ比は約 19 で、簡単な 2 ビットの量子プロトコルの実行に成功した。都合周辺回路としては、超伝導マイクロ波チップの基本技術を確認し、高速読み出し回路の研究も進めている。システム構成の基盤となる広帯域マルチチップモジュール技術を確認した。今後は量子ビット数の更なる集積とより複雑な量子アルゴリズムの実行、量子ビットと周辺回路の融合などを目指す。

2. 研究実施内容

超伝導量子ビットにおいてはデコヒーレンス要因の特定はデコヒーレンス時間の改善を図るための喫急の課題である。磁束量子ビットのデコヒーレンス要因を調べるために、磁束バイアスや読み出し用 SQUID の電流バイアスの関数として、エネルギー緩和および位相緩和について詳細に測定した。その結果、(i) 磁束バイアス、電流バイアス双方について、位相緩和時間を最大にする最適な動作点が存在し、その条件下ではエネルギー緩和がデコヒーレンスの主要な要因であること。(ii) 磁束バイアスを最適動作点からずらすと、低周波の $1/f$ 磁束ノイズによる位相緩和が支配的になり、その位相緩和関数は指数関数的でなく、ガウシアン型であること。また $1/f$ 磁束ノイズの強度は $(10^{-6}\Phi_0)^2/\text{Hz}$ 程度であること。(iii) 電流バイアスを最適動作点からずらすと SQUID バイアス電流の揺らぎが位相緩和を支配するが、その緩和は指数関数的であり、電流揺らぎはバイアス回路のインピーダンスの量子揺らぎと理解できること、などが明らかになった。ただし、最適動作点でコヒーレンスを制限するエネルギー緩和の機構についてはまだ明らかになっていない。また低周波磁束ノイズの起源についても理解されていない。

磁束量子ビットにおいて、エコー無しで 3 マイクロ秒というこれまでにない長いデコヒーレンス時間 (T2)を得た。

前年度、電荷量子ビットのデコヒーレンスを支配す電荷揺らぎの要因が、幅広いエネルギー分布を持つ2準位系の集まりによるものとするモデルを提案した。今年度は、低周波の1/f電荷ノイズの温度依存性がモデルから予想される T^2 依存性と一致することを実験的に示した。

量子計算を効率的に行うには、随時相互作用をオンオフできる可変結合の実現が強く望まれる。デコヒーレンスの研究から明らかになったように、磁束量子ビットは最適動作点であるところの半量子化磁束バイアス条件下において最もコヒーレンスが良く保たれる。一方、この点においては基底状態および励起状態における周回電流の期待値は0になってしまう。そのため磁束量子ビット間の最も自然な結合方式である相互インダクタンスによる磁氣的結合は、2つの量子ビットがほぼ縮退したエネルギーを持っていない限り有効に働かない。それぞれ最適動作点にバイアスされた2つの量子ビットの間に、特性エネルギーがずっと大きい第3の量子ビットを挿入し、この結合用量子ビットに2つの結合される量子ビットの差または和周波数を印加することによりパラメトリックに結合を誘起する方法を提案した。この方法では静的な結合を完全に0にすることも可能であること、またマイクロ波パルスのみで結合をオンオフできることが利点である。

上で提案した可変結合方式を実証するための実験を行った。3つの磁束量子ビットが一行に並び、最近接量子ビット間で、共有したループの一部のキネティックインダクタンスを介した磁氣的結合を有しているような素子を用いた。3量子ビット全体のスペクトロスコープから個々の量子ビットおよびそれらの相互作用のパラメータを精確に決定した。また外側の2つの量子ビットの差及び和周波数においてパラメトリックに誘起される遷移をそれぞれ状態01と10間及び00と11間のラビ振動として観測した。これは超伝導量子ビットにおけるダイナミカルな可変結合の初めての実証と言え、論理動作としては2重制御付否定論理(DCNOT)に相当する。結合のオンオフ比は約19であった。この2ビット回路では1ビットの状態制御と2ビットの論理動作が結合のオンオフで語句率に実現できるので、それらを組み合わせた簡単な2量子ビットの量子プロトコルの実行に成功した。

理論グループでは以下の成果を得た:量子ビットとデータベースのエネルギーをディチューンして作成すると、おのおの独立したサブシステムとみなすことができる。しかし時間依存電磁界を量子ビットに印加することにより、マイクロは周波数を選んで印加することにより、データベースを介して任意の二つの量子ビット同士を選択的に結合させることを示した。高度に絡み合ったクラスター状態を超伝導電荷量子ビットのゲート電圧を変化させることによってワンタッチ操作で作り出しことができることを示した。量子ビットのばらつきによるクラスター状態の不変性を考慮し、その結果クラスター状態を使った量子計算が固体量子ビットにとって期待できるアプローチであることを示した。

SFQ回路の低消費電力化については、消費電力を約20分の1にするバイアス電流供給法を提案し、実験により本方法の妥当性を示した。SFQ回路を用いた高速パルス発生器の開発では、超伝導量子ビットの制御のための高速可変電圧パルス発生器を開発し、その動作検証を行った。SFQ回路を用いたマイクロ波発振器の開発では、外部マイクロ波を高速にスイッチするマイクロ波チョップを提案し、その動作検証を行った。今後は、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、超伝導量子ビットの状態操作を目指す。

SFQ 回路による量子ビットの高速な読み出しに関しては、最終的に数値解析および実験を進めた回路作成した(現段階では量子ビットは搭載していない)。100mK での SFQ 回路の動作を想定し、臨界電流密度 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 、バイアス電流は臨界電流の 70%として計算すると、電流・遅延時間変換率は $2.5\text{ps}/\mu\text{A}$ となり、より低いバイアス電流では $5\text{ps}/\mu\text{A}$ 程度まで変換率は上昇する。一方、量子ビットのインダクタンスとスプリッタ間の結合係数はたかだか 0.1 と考えられ、この方法では 250-500fs の時間精度が時間-デジタル変換器に要求されることがわかった。時間精度にもっとも大きな影響を与えるパラメータがジッタである。そこで、回路のジッタをいくつかの手順で評価した。その結果、シャント抵抗付ジョセフソン接合 1 個当たりのジッタは、3.2K、4.2K、5.4K でそれぞれ 51fs、65fs、75fs となり、少なくとも測定温度領域では熱雑音が大きなジッタの原因であることを示唆している。量子ビットと同じ動作温度である 100mK に外挿すると熱によるジッタは標準抵抗値であっても 10fs 程度となる。実際にはシャント抵抗は取り除かれることから、量子状態の読み出しに当たっては、熱よりも $\sim\text{fs}$ の量子揺らぎの方がジッタの主要因となると考えている。また DFF などの回路に使われるジョセフソン接合数は僅かであるにもかかわらず、0.76ps という大きなジッタが観測された。平均値で見ると、4.2K で 1 コンパレータ(2 接合)当たり 0.36ps のジッタとなり、これは単純な 1 接合の約 6 倍となっている。大きなジッタの原因の追究は今後の課題であるが、他研究機関の間接的な評価方法と比較して考えると、温度とともに小さくなり、またシャント抵抗の除去によって十分小さな値にまで抑えられ、目標とする 100fs の時間精度は十分達成可能と考えている。

SFQ 回路を量子ビットと同じミリケルビン温度領域に置く場合、熱雑音に対応したレベルまでジョセフソン接合の臨界電流値を下げて発熱を抑制することが重要である。プロセス的にはジョセフソン接合の臨界電流値を 4.2K 動作の $2,500\text{A}/\text{cm}^2$ から $1/7$ の $350\text{A}/\text{cm}^2$ に下げることにより、この低臨界電流に対応した研究を行った。基本的な SFQ 回路(DC/SFQ-JTL-SFQ/DC)を試作し、4.2K と 0.35K において測定を行った。測定においては外来ノイズ削減を行い、最小臨界電流値が $12\mu\text{A}$ と通常の SFQ 回路と比べて約 $1/10$ の大きさであったにもかかわらず、4.2K で 0.02%、0.35K で 0.002%のビットエラーレートが得られた。抵抗体に発生するジョンソンノイズを測定することにより、温度計自身の発熱無しに極低温温度を知ることができる。測定の感度を向上するためにプリアンプに SQUID を用いたジョンソンノイズ温度計を開発し、MCM 上での温度分布を測定した。MCM に装着するチップ上にヒータを取り付け、それによるチップおよび MCM キャリア上の温度変化を複数の温度計で測定した。その結果、チップからキャリアまでの熱コンダクタンスが $740\mu\text{W}/\text{K}$ であることがわかった。本手法を用いることで、MCM チップ上またはチップ間の熱コンダクタンスを測定することが可能となり、SFQ 回路の動作により発生する熱が超伝導量子ビットに与える影響を精度良く見積もることが可能となった。

3. 研究実施体制

(1)「NEC」グループ

①研究者名

蔡 兆申 (NEC基礎・環境研究所理化学研究所 主席研究員非常勤チームリーダー)

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

(2)「ISTEC」グループ

①研究者名

日高 睦夫 (超電導工学研究所 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

(3)「横浜国立大学」グループ

①研究者名

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

(4)「名古屋大学」グループ

①研究者名

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

(5)「理研」グループ

①研究者名

Nori, Franco (理化学研究所フロンティア研究システム チームリーダ)

②研究項目

- ・量子情報処理の物理的実現のための理論的研究

(6)「SUNY 理論」グループ

①研究者名

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コヒーレンス
- ・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

(7)「SUNY 設計」グループ

①研究者名

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

(8)「東京大学」グループ

①研究者名

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. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- **“Temperature Square Dependence of the Low Frequency $1/f$ Charge Noise in the Josephson Junction Qubits”**
Physical Review Letters, 96, 137001, 2006 Apr.
O. Astafiev, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, T. Yamamoto, and J. S. Tsai
- **“Parity effect in superconducting aluminum single electron transistors with spatial gap profile controlled by film thickness”**
Applied physical Letters, 88, 212509, 2006 May
T. Yamamoto, Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev and J. S. Tsai
- **“The influence of the ground current on large-scale single-flux-quantum circuits”**
Supercond. Sci. Technol. 19, S362—S365, 2006 May
K. Fujiwara, T. Hikida, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, S. Yorozu, H. Terai
- **“Fabrication of Ultrasmall All-Nb Tunnel-Junction Devices with Ion Beam-Oxidized Barriers”**
Journal of the Korean Physical Society Vol.48 6 pp1560-1564, 2006 Jun

- H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
- **“Design and implementation of low-power SFQ circuits using LR-load biasing technique”**
Physica C, vol. 445-448, pp.1029-1033, 2006 Oct.
T. Nishigai, S. Yamada, N. Yoshikawa
 - **“On-chip microwave generator for manipulation of superconductive quantum bits”**
Physica C, vol.445-448, pp.967-970, 2006 Oct.
Y. Yamanashi, T. Asano, N. Yoshikawa
 - **“Decoherence of Flux Qubits due to 1/f Flux Noise”**
Physical Review Letters, 97, 167001, 2006 Oct.
F. Yoshihara, K. Harrabi, A. O. Niskanen, Y. Nakamura, and J. S. Tsai
 - **“Comment on “Charge-qubit operation of an isolated double quantum dot””**
Physical Review Letters, 97, 208901, 2006 Nov.
O. Astafiev, Y. Nakamura, Yu . A. Pashikn, T. Yamamoto and J. S. Tsai
 - **“Scalable superconducting qubit circuits using dressed states”**
Physical Review A, 74, 052321, 2006 Nov.
Yu-xi Liu, C. P. Sun and Franco Nori
 - **“Spectroscopy of three strongly coupled flux qubits”**
Physical Review B 74, 220503(R), 2006 Dec.
A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura and J. S. Tsai
 - **“Producing Cluster States in Charge Qubits and Flux Qubits”**
Physical Review Letters, 97, 230501, 2006 Dec.
T. Tanamoto, Y. Liu, S. Fujita, X. Hu and Franco Nori
 - **“Characterization of all-Nb nanodevices fabricated by electron beam lithography and ion beam oxidation”**
J. Vac.Sci.Technol. B25(2), pp448-454, 2007 Mar.
H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura and J. S. Tsai
 - **“Vertically-coupled quantum wires in a longitudinal magnetic field”**
Applied Physics Letters, v. 90, 2007 Mar.
L. G. Mourkh, A. Yu. Smirnov and S. F. Fisher

(2) 特許出願

平成 18 年度特許出願 : 1 件 (CREST 研究機関累積件数 : 1 件)