

「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

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。多ビット量子計算にとって大変重要な、ビット間の結合をオンオフできる結合器を試作し、それを使った簡単な 2 ビットの量子プロトコルの実行した成果が **Science** 誌に掲載された。超伝導量子ビットとマイクロ波共振器を組み合わせた回路でレーザー発振を実現した成果が **Nature** 誌に掲載された。周辺回路としては、低電流密度回路方式の超伝導マイクロ波チョッパを実現し、希釈冷凍機温度で量子ビットと組み合わせて実験を薦めることが可能とした。量子非破壊読み出しを実現するための数種の超伝導アンプの開発を含めたいくつかの研究を進めている。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

我々はビット間結合を制御可能な量子ビットの実証に世界で初めて成功し、その成果は **Science** 誌に掲載された。これまでにいくつかのグループにより、超伝導量子ビット間の固定された相互作用を利用した 2 ビットゲートの実証が行われている。しかしながら固定された相互作用は、量子演算を実現するうえで大きな制約となる。結合した量子ビットの系で、1 ビットの量子状態の制御を正確に行うには、結合を一時切る必要がある。結合を切ることは読み出し時にも量子ビット間の望ましくない干渉をなくすことができる。そのため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ていた。

量子コンピュータの実現には、その構成要素である 1 量子ビットの量子状態の制御技術

と、2量子ビット間の情報のやり取りをダイナミックにオン/オフするビット間の結合制御技術の二つが必要である。このたびの成果は、新たに開発した可変式結合回路により、量子ビット間の結合制御に世界で初めて成功したものだ。このたびの開発により、量子アルゴリズムに従った量子演算が初めて可能となり、量子コンピュータの実現に向けて大きな前進となる。

量子コンピュータによる計算は、量子アルゴリズムに従い、複数の量子ビットの状態を時系列的に外部から変化（制御）させることで行う。本グループは、結合を制御するメカニズムとして、量子ビット間の結合を新たなもう1つの量子ビットを用いて実現するという、オリジナルな原理を考案した。回路パラメータを最適化することで、結合用量子ビットを、量子ビット間の磁気結合をオン・オフ切り替えできる非線形な磁束トランスとして動作させる。オン・オフ切り替えは、マイクロ波を入力するだけで可能で、量子ビットの状態を乱すことなく結合を制御できる。また、結合回路は量子ビットの形式をとっているため、この結合制御量子ビットを用いた量子コンピュータ回路の物理的構成は量子ビットの繰り返し構造となり、ビット数に対してスケールアップ可能な回路とすることができる。今回は、以上の結合用量子ビットの動作原理・回路設計・物理配置などの結合制御コンセプトの実証を目指し、2つの量子ビットと1つの結合制御用量子ビットからなる最小単位の回路で、ビット間結合を制御しながら量子ビットの制御を実現することに成功した。本成果により、量子アルゴリズムに従った量子演算が初めて可能となり、固体素子量子コンピュータの領域において、世界に先駆けてデバイスレベルから回路レベルへの質的なステップアップを果たしたと言える。

超伝導量子ビットを共振器と強く結合させることで、たった一つの原子が発する光子をもとにレーザー発振させることに成功し、その成果は **Nature** 誌に掲載された。このような極めて単純なシステムを使ったレーザー発振の成功は画期的なことだ。また、超伝導量子ビットが光子を発生する「原子」として機能することを利用してレーザー発振に成功したのは、世界で初めてのことで、固体電子素子である超伝導量子ビットの、共振器内の媒質として取り扱いやすく、かつ回路パラメータをゲート電圧や局所磁場などにより容易に制御できる“人工の原子”である特徴を活用し、レーザー発振システムに利用した。人工原子がつくる光子の発生率は0.5ナノ秒に1光子程度で、超伝導量子ビットに電流を流すことによって、約10ギガヘルツのマイクロ波周波数領域のレーザー発振を実現した。さらに、このレーザー発振システムにマイクロ波を外部から投入すると、約3倍程度のパワー増幅のあることや、電磁波の位相を整える機能のあることを確認し、レーザー発振を正しく行っていることを確かめた。この発振システムは、今後、レーザー発振の基礎的研究に貢献することはもとより、電子情報を電磁波に変換する情報システムや量子ビット制御・読み出しに必要なコンパクトなマイクロ波源や、絶対安全性を有する情報管理に欠かせない量子暗号を実現するツールなどとして使われることが期待される。

超伝導量子ビットの理論的研究では、モードエンタングルメントの計測、量子クローニ

ング不可理論のコンディション、周波数選択による電荷量子ビットの可変結合法の提案、機械的共振器を伝送線に結合させる冷却法の提案、量子熱力学サイクルと量子熱エンジンの研究、などの研究を行った。

超伝導共振器を用いた量子ビット読み出しのための SQUID マイクロ波増幅器(SQA)は、量子ビットの状態変化による共振状態の変化を読み出す。この状態変化は非常に微弱なため、精度の良い読み出しを行うためには通常の半導体増幅回路では実現できないような低雑音の増幅回路が必要になる。また、量子ビットの共振周波数である数~10 GHz に対応する必要もある。SQA は原理的に量子限界に近い雑音特性を実現可能だが、従来は 5 GHz 程度の物までしか実用的なゲインを持った素子は開発されていなかった。我々は NEC グループの量子ビットで典型的に使用されている 10 GHz において 10dB のゲイン、1GHz 以上の帯域を目標に SQA の設計、製作を行った。製作した素子の性能を評価したところ、ゲイン、帯域等に関しては目標の性能が得られた。雑音特性についても量子限界に非常に近い性能が出ていることが明らかになったが、現在は測定方法の改良を行い、精度の向上を目指している。

超伝導量子ビット近くの極低温で動作できる消費電力の小さな低臨界電流 SFQ 回路を開発している。測定環境を大幅に見直した結果、雑音の影響を受けやすい低臨界電流 SFQ 回路を、液体ヘリウム温度でも動作評価することが可能になった。また複雑な論理回路を製作するため、低臨界電流 SFQ 回路用のセルライブラリを開発し、動作の評価を行った。

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。本研究では、SFQ 回路を用いたマイクロ波チョッパ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する。

今年度は、これまでに検討した LR ロードによる低消費電力型の SFQ 回路を用いて、超伝導量子ビット操作のマイクロ波チョッパモジュールの開発を行った。マイクロ波チョッパの構成に必要なインピーダンス変換用フィルタを設計し、それらと SFQ スイッチを高周波 PC ボード上に集積化したマイクロ波チョッパモジュールを設計・試作した。これにより、SFQ マイクロ波チョッパを超伝導量子ビットと同一温度ステージに実装し、超伝導量子ビットの量子状態操作を試みる事が可能となった。マイクロ波チョッパの出力振幅ならびに全消費電力は、それぞれ $60\mu\text{V}$ 、 $7\mu\text{W}$ であった。

また、オンチップマイクロ波発信器を用いて多数の集積化超伝導量子ビットを制御することを目的として、SFQ マイクロ波発信器の低ジッタ化の研究を行った。SFQ 回路のダンピング抵抗をパッシブ伝送線路で置き換えることで、SFQ マイクロ波発信器のジッタを約 3 分の 1 に低減できることを数値シミュレーションにより示した。

SFQ 回路による量子ビットの高速な読み出しに関しては、電流分解能を評価することで読み出し回路の有効性の検証を試みた。提案している読み出し回路では、そのヘッド部において磁束量子ビットの右回りの電流と左回りの電流を SFQ の伝搬遅延時間の増減に変換し、それを識別器において判別する。平成 18 年度までの研究において、この読み出し法の検出限界を決めるジッタに

ついて実験をベースに詳細な検討を行ってきた。その結果をもとに平成 19 年度は、ジョンソン雑音によるジッタを低減するために、ジョセフソン接合の臨界電流値の最適化、読み出し回路のバイアス電流供給方法・供給値の最適化、大きなジッタを発生する回路要素の排除を行ったほか、外部からの雑音低減のためのジョセフソンレギュレータを導入した。また、磁束量子ビットの電流を効率良く検出するために磁気結合係数を大幅に増加させた。これらの改良により、4K における1回のサンプリングに対する電流分解能として $0.8\mu\text{A}$ を達成した。動作温度を量子ビットと同じ温度まで低下させれば、ジッタは大幅に低減し、磁束量子ビットの状態を読み出すことが十分に可能と考えられる。たとえ読み出し回路からのバックアクション低減のために量子ビットと読み出し回路の結合を弱めたとしても、本方法では1回のサンプリングに 10ps 程度の時間しか必要とせず、コヒーレント時間内での複数サンプリングによる尤度判定が可能となり、シングルショット計測が十分視野に入ってきたと考えられる。

3. 研究実施体制

(1)「NEC」グループ

- ① 研究者名: 蔡 兆申 (NECナノエレクトロニクス研究所)
中村 泰信 (NECナノエレクトロニクス研究所)
- ② 研究項目
 - ・量子ビットシステムの研究

(2)「ISTEC」グループ

- ① 研究者名: 日高 睦夫 ((財)国際超電導産業技術研究センター)
- 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)
- ② 研究項目
 - ・SFQ による量子ビットの操作

(4)「名古屋大学」グループ

- ① 研究者名: 藤巻 朗 (名古屋大学)
- 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)

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 設計」グループ

①研究者名:セミノフ、ヴァシリー(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)

②研究項目

・量子ビット用 SFQ 設計・最適化

(7)「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)

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

(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性理論研究部門)

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)

“Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits”

Science 316, 723, May 2007

A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai

“Efficient one-step generation of large cluster states with solid-state circuits”

Phys. Rev. A **75**, 052319, May 2007

J.Q. You, X.-B. Wang, T. Tanamoto, F. Nori

“Control of photon propagation via electromagnetically induced transparency in lossless media”

Phys. Rev. A **75**, 063818, June 2007

L. He, Y.X. Liu, S. Yi, C.P. Sun, F. Nori

“Development of SFQ Multi-Chip Modules for Quantum Bits”

IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 158-161, June, 2007.

T. Miyazaki, S. Yorozu, M. Maezawa, M. Hidaka and J.S. Tsai

“Study of LR-Loading Technique for Low-Power Single Flux Quantum Circuits”

IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 17, June 2007, pp. 150-153.

Y. Yamanashi, T. Nishigai, N. Yoshikawa

“Design of an SFQ Microwave Chopper for Controlling Quantum Bits”

IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 17, June 2007, pp. 146-149.

G. Matsuda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

“Timing Jitter Measurement in Single-Flux-Quantum Circuits Based on Time-to-Digital Converters with High Time-Resolution”

IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, No.2, 552-555, 2007 June

M. Terabe, A. Sekiya, T. Yamada, A. Fujimaki

“Classical and quantum operation modes of the reversible Josephson junction circuits”

IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol. 17, #2, pp. 455-60 June 2007

V.K. Semenov, G.Danilov and D.V. Averin

“Low-frequency charge noise in suspended aluminum single-electron transistors”

Appl. Phys. Lett. 91, No.3,033107, Jul. 2007

Pashkin Y, Astafiev O.V, Nakamura Y., Tsai J.

“Parity effect in Al and Nb single electron transistors in a tunable environment”

Applied Physics Letters 91, 6, 063512, Aug. 2007

Yu. A. Pashkin, T. F. Li, H. Im and J. S. Tsai

“Two-Mode Squeezed States and Entangled States of Two Mechanical Resonators”

Phys. Rev. B **76**, 064305, Aug. 2007

F. Xue, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

“Variable-frequency-controlled coupling in charge qubit circuits: Effects of microwave field on qubit-state readout”

Phys. Rev. A **76**, 022317, Aug. 2007

X.-L. He, Y.X. Liu, J.Q. You, F. Nori

“Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines”

Phys. Rev. E **76**, 031105, Sep. 2007

H. T. Quan, Yu-xi Liu, C. P. Sun, and Franco Nori

“Global Relaxation of Superconducting qubits”

Phys. Rev. B, **76**, 100505, Sep. 2007

T. Ojanen, A. O. Niskanen, Y. Nakamura and A. A. Abdumalikov Jr.

“Single artificial-atom lasing”

Nature Vol449, Oct. 2007

O. Astafiev, K. Inomata, T. Yamamoto, Yu. Pashikin, Y. Nakamura, J. S. Tsai

“Teleportation of qubit states through dissipative channels: Conditions for surpassing the no-cloning limit”

Phys. Rev. A **76**, 042325, Oct. 2007

Sahin Kaya Ozdemir, Karol Bartkiewicz, Yu-xi Liu, and Adam Miranowicz,

“Superconducting qubits can be coupled and addressed as trapped ions”

Phys. Rev. B, **76**, 144518, Oct. 2007

Liu Y., Wei L., Johansson R., Tsai J, and Nori F.

“Cooling a Micro-mechanical Beam by Coupling it to a Transmission Line”

Phys. Rev. B **76**, 205302, Nov. 2007

F. Xue, Y.D. Wang, Y.-x. Liu, F. Nori

“Decoherence in a superconducting flux qubit with a π -junction”

Physical Review B, **76**, 172502, Nov. 2007

T. Kato, A. A. Golubov, and Y. Nakamura

“Detecting mode entanglement: The role of coherent states, superselection rules and particle statistics”

Phys. Rev. A **76**, 052113, Nov. 2007

S. Ashhab, K. Maruyama, F. Nori

“Resonances between fluxons and plasma waves in underdamped Josephson transmission lines of stripline geometry”

Phys. Rev. B, 77, 024511-1--024511-6, Jan, 2008

J. Pfeiffer, A. Abdumalikov, M. Schuster and A. V. Ustinov

“Interqubit coupling mediated by a high-excitation-energy quantum object”

Phys. Rev. B, 77, 14510, Jan. 2008

Ashhab S. S, Niskanen A. O., Harrabi K., Nakamura Y., Picot T., Groot P., Harmans C., Mooij J., and Nori F.

“High-frequency metallic nanomechanical resonators”

Appl. Phys. Lett., 92, No. 4, 043112, Jan. 2008

Li T., Pashkin Y., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J. S., Im H.

“Simultaneous Cooling of an Artificial Atom and Its Neighboring Quantum System”

Phys. Rev. Lett. 100, 047001, Jan. 2008

J. Q. You, Yu-xi Liu, and Franco Nori

“Spectroscopy of superconducting charge qubits coupled by a Josephson inductance”

Phys. Rev. B, 77, 064505, Feb, 2008

Yamamoto T., Watanabe M., You J. Q., Pashkin Y., Astafiev O., Nakamura Y., Nori F., and Tsai J. S.

“Controllable Coherent Population Transfers in Superconducting Qubits for Quantum Computing”

Phys. Rev. Lett. 100, 113601, Mar. 2008

L. F. Wei, J. R. Johansson, L. X. Cen, S. Ashhab, and Franco Nori,

“Deterministic generation of large cluster states using non-deterministic collective measurements based on quantum Zeno effect”

[arXiv:quant-ph/0701007v1](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0701007v1) (2007).

X. Wang, J.Q. You, F. Nori

“The physics of Maxwell’s demon and information”

,arXiv:0707.3400, submitted to Rev. Mod. Phys.

K. Maruyama, F. Nori, and V. Vedral

“Entanglement purification using natural spin chain dynamics and single spin measurements”

arXiv:0802.2588, submitted to Phys. Rev. Lett.

K. Maruyama and F. Nori

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:0 件 (CREST 研究期間累積件数:1 件)