

量子超越性を実証する超伝導スピントロニクス

大規模量子計算回路の創出

Large-scale superconducting spintronics quantum computing circuits toward the realization of quantum supremacy

課題番号：19H05615

山下 太郎 (YAMASHITA Taro)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、超伝導量子回路の性能を劣化させる雑音源となる酸化物を排除した磁性ジョセフソン接合（ π 接合）技術を軸に、大規模化に適した外部磁場印加を不要とする π 量子ビットを備えた π 量子回路と、量子状態制御用の超低電力で高速動作が可能な超伝導回路を実現し、それらを融合した大規模量子計算回路を創出することで量子超越性の実証を目指す。

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：超伝導デバイス、スピントロニクス、量子計算

1. 研究開始当初の背景

近年、超伝導体を用いた量子計算機の実現を目指し全世界的な競争が加熱している。その成否の鍵を握るのが、量子計算機の構成単位である量子ビットの性能を損なうことなく、多数の量子ビットを備えた大規模量子回路を実現できるかどうかという点である。量子ビットにおける重要な性能指標のひとつに、量子状態の寿命を表すコヒーレンス時間があるが、量子ビット数の増加に伴う外的・内的雑音の増大や制御困難性等によりコヒーレンス時間が低下するため、現状では古典計算に対する優位性を表す量子超越性の実証には至っていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、磁性ジョセフソン接合（ π 接合）という超伝導スピントロニクス技術を量子回路及び量子制御回路へ導入することで、量子ビットの大規模化における障壁克服や制御回路の低電力化を行い、コヒーレンス時間の低下を抑制した大規模な量子計算回路を実現し量子超越性の実証を目指す。

3. 研究の方法

従来の超伝導磁束型量子ビットでは、量子動作のために外部磁場の印加が必要であり、さらに最適動作点と呼ばれるコヒーレンス時間が最長となる動作点を実現するために

は、ちょうど半磁束量子が量子ビットへ印加されるよう磁場を精密に制御する必要がある。そこで本研究では、超伝導スピントロニクス素子のひとつである磁性ジョセフソン接合（ π 接合）を量子ビットへ導入した、外部磁場フリー動作が可能な独自の π 量子ビットを用いる。これにより、大規模化における制御困難性を解消することが可能となり、磁場印加配線に起因する雑音増大の抑制も期待される。また良好なコヒーレンス時間を得るためには材料選択も重要だが、我々が開発した雑音源となる酸化物を排除した窒化物NbN接合を採用することで、コヒーレンス性に優れた量子回路を実現する。

また、量子回路の大規模化に伴い室温からの量子制御用配線が増加するため、外界からの雑音増大も懸念される。本研究では量子制御回路として極低温動作する超伝導論理回路を用いることで、雑音源の究極的な排除を目指す。量子回路と同じミリケルビンレベルの極低温下での動作を可能とするため、 π 接合の導入により従来の超伝導論理回路を更に低電力化した、独自の半磁束量子（Half Flux Quantum; 以下 HFQ）回路を実現し量子回路との融合を目指す。

4. これまでの成果

π 量子ビットについて、具体的な素子構造として従来のジョセフソン接合を含んだ超伝導ループへ、位相シフタとして機能する

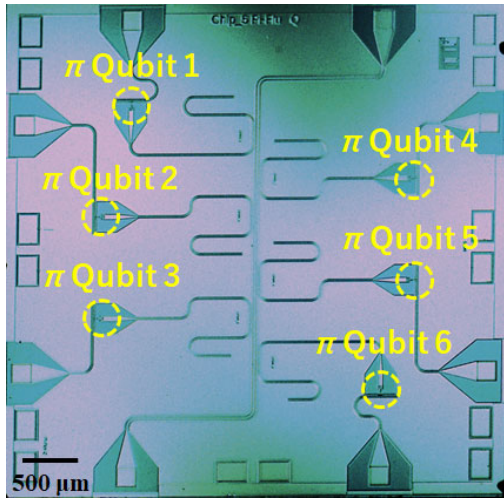


図 1. 開発した 6 個の π 量子ビットを備えた π 量子回路の顕微鏡写真.

NbN ベースの π 接合を組み込んだ構造を採用し開発を進めた。量子ビットを構成するジョセフソン接合として、一般的な Al ジョセフソン接合を用いた Al-NbN ハイブリッド型と、エピタキシャル成長可能な NbN/AlN/NbN 接合を用いたオール NbN 型の 2 種類を並行して取り組んだ。その結果、ハイブリッド型 π 量子ビットに関して、外部磁場フリー動作実証に成功した。また量子ビット寿命として、従来の報告に対し 400 倍の改善となる 1.6 マイクロ秒を達成した。オール NbN 型についても、量子ビットと同様なループ構造における臨界電流の磁場依存性の測定から、半磁束量子分の位相シフト効果を観測することに成功した（発表論文[1]）。現在量子ビットの特性評価中である。さらに、並行して開発した π 接合なしの NbN 型量子ビットにおいて 16 マイクロ秒の優れた量子ビット寿命が得られたことを受け、図 1 に示すような 6 個の π 量子ビットを含んだ中規模 π 量子回路を作製し評価中である。

量子状態制御用の HFQ 回路については、まずは理論的基盤を確立するため、数値解析により π 接合を含むジョセフソン伝送線路を詳細に調べ、量子状態制御に要求されるレベルの低電力性と高速動作性が両立可能なことを理論的に示した（発表論文[2]）。HFQ 回路の基本構造はジョセフソン接合（0 接合）と π 接合を含んだループ素子であるが、最初の回路実証に向け、等価かつ作製プロセスが簡便な 3 つの π 接合素子（ π ループ）構造を採用した。まず HFQ 回路の動作原理実証のため、2 つの π ループを含む素子を作製・評価し、HFQ 回路が実際に半磁束量子単位で動作することを直接的に実証した。さらに、HFQ 要素回路として HFQ 分周回路を設計・作製し、入出力部の平均電圧を比較すること

で、分周回路動作の実証に成功した。また低電力超伝導回路について、消費電力を定量的に評価する手法を開発するとともに、新しい量子ビット制御手法として、超伝導回路による量子ゲート操作パルス照射回路を考案した。更なる低電力化に向け HFQ 回路による構成を検討中である。

そして、 π 量子ビットと制御回路の融合に向け、両回路を同一基板上に集積化した、モノリシック回路開発についても計画を前倒しして取り組んだ。量子回路部と制御回路部を平面上で分けた隣接型モノリシック回路構造を考案し、回路作製プロセスを決定し試作を進めた結果、量子ビットに一般的に使用される Si 基板上に、オール NbN 型 π 量子ビットと制御回路のモノリシック回路の作製まで完了した。現在作製した回路の評価を進めている。

5. 今後の計画

π 量子ビット回路のビット数増加やビット間の直接結合等による量子ビット性能への影響を調べつつ、大規模な π 量子回路の開発を進める。並行して、HFQ 回路による新しい量子状態制御方式の検討や制御回路の開発を進め、今回考案したモノリシック回路構造と作製プロセスをベースに、大規模モノリシック回路の実現と量子超越性実証を目指し研究を推進する。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む） 発表論文のうち 3 報を以下に挙げる：

[1] Taro Yamashita, Sunmi Kim, Haruki Kato, Wei Qiu, Kouichi Semba, Akira Fujimaki, Hirota Terai, “ π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate,” *Scientific Reports*, vol. 10, Article number: 13687, pp. 1-6 (2020).

[2] Feng Li, Yuto Takeshita, Daiki Hasegawa, Masamitsu Tanaka, Taro Yamashita, Akira Fujimaki, “Low-power high-speed half-flux-quantum circuits driven by low bias voltages,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 2, Art. 025013, pp. 1-6 (2021).

[3] Taro Yamashita, “Magnetic Josephson junctions: new phenomena and physics with diluted alloy, conventional ferromagnet, and multilayer barriers,” *IEICE Transactions on Electronics*, accepted.

上記含め発表論文 11 報、国際/国内会議発表 70 件以上（うち招待講演 16 件）。

7. ホームページ等

<http://www.super.nucee.nagoya-u.ac.jp/>