

研 究 報 告 書

「超伝導位相制御素子によるスケーラブル量子技術」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 山下 太郎

1. 研究のねらい

本研究のねらいは、超伝導量子デバイスにスピントロニクス概念を融合させることで、超伝導単体では実現が困難なレベルの高いスケーラビリティを有する、新しい位相制御型の量子計算素子(量子ビット)及び超伝導回路の基盤技術を創出することである。

近年、超伝導量子ビットは設計可能かつ良好なコヒーレンス時間を有する特長から、量子計算機の実現に向けた有力な候補として研究が進められている。ところが従来の磁束型超伝導量子ビットでは、量子ビット動作を行うために外部磁場の印加が必要不可欠であり、多量子ビットを備えた大規模量子回路の実現を妨げる主要因となっている。磁束型量子ビットは3つのジョセフソン接合を含む超伝導ループで構成されるが、動作のためには半磁束量子に相当する外部磁場をループに印加することが必要不可欠である。単一またはごく少数の量子ビットの場合には磁場を調整すればよいが、多量子ビット化した際には素子サイズのばらつきや磁場の空間不均一性のため、全量子ビットを動作点に調整するのは極めて困難となる。またコヒーレンス性の観点からも、磁場印加用マグネットからの磁気的雑音と量子ビットの結合によるデコヒーレンスも懸念される。

そこで本研究では、「スピンジョセフソン接合(以下 Spin-JJ)」を導入することで、上記の主要課題の克服を目指す。Spin-JJ は磁性層を超伝導体で挟んだ構造をもつが、磁性層の膜厚を制御することで、両側の超伝導位相差が π の場合に安定となる「 π 状態」が発現することが知られており、位相制御素子として機能する。この Spin-JJ を磁束型量子ビットに導入し、超伝導ループに自発的な位相のねじれを発生させることで、磁場ゼロで動作可能な「磁束バイアスフリー」量子ビットを実現する。量子ビット毎の外部磁場調整が不要となるため、多量子ビット化におけるスケーラビリティの飛躍的な向上が期待される。また、量子ビットの周辺回路にも Spin-JJ 導入を検討する。単一磁束量子回路等の超伝導論理回路は、極低温下での低電力性と超高速性を両立可能であるため量子ビットの周辺回路応用が期待されるが、ミリケルビンレベルの超極低温下では回路の発熱等が懸念される。そこで本研究では、超伝導論理回路へも Spin-JJ を導入することで、量子ビット信号処理に向けた超伝導回路応用に関する基盤技術の構築を狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では3つの研究テーマ、A)位相制御素子の作製・評価技術の構築、B)位相制御素子を組み込んだ磁束バイアスフリー量子ビットの実証、C)位相制御素子を用いた超伝導論理回路の基盤技術構築、に関して研究を進めた。

テーマ A に関しては、量子ビット応用に適した窒化物ベースの Spin-JJ (NbN/CuNi/NbN 接合、CuNi が強磁性体)を作製し、窒化物 Spin-JJ として世界で初めて位相制御素子として動作する π 状態の実証に成功し、論文発表及びプレスリリースを行った。その後基板を誘電

損の大きい MgO から量子ビットに利用可能な Si へと移行し、Si 基板上への TiN バッファ層技術を融合することで、高性能な量子ビットの実現に重要となる、酸化物フリー Spin-JJ 技術を確立した。並行して、Spin-JJ でのエネルギー散逸の抑制が期待される絶縁層 AlN 付き Spin-JJ も作製し、臨界電流等の物理パラメータを体系的に明らかにした。

テーマ B に関しては、主に 2 種類の量子ビット構造について研究開発を行った。ひとつ目は、窒化物 Spin-JJ と Al ベースの量子ビット接合のハイブリッド構造である。位相シフタとして NbN/CuNi/NbN 接合を利用し、磁束型量子ビットを構成する接合としては既に確立された斜め蒸着法により作製した Al/AIO_x/Al 接合を採用することで、確実な量子ビットの実現を目指した。その結果、本研究最大の目標であった、Spin-JJ 量子ビットの磁束バイアスフリー動作実証に成功した。励起状態から基底状態へのエネルギー緩和時間としても 1 μ s を超える性能が得られており、性能向上に向け設計・プロセス等様々な観点から改善を継続中である。もうひとつは、全てを窒化物接合で構成するオール窒化物構造である。こちらは窒化物 Spin-JJ の特性制御や作製プロセスの難易度が高かったが、量子ビット動作実証に成功し、現在磁束バイアスフリー動作に関して検証中である。

テーマ C に関しては、断熱型磁束量子パラメトロン(AQFP)回路と呼ばれる超伝導回路へ Spin-JJ の導入を行い、従来型よりも小型化・集積化に適した構造を提案した。また単一磁束量子(SFQ)回路に関しても Spin-JJ を導入することで、静的な電力消費が低減可能なことを示した他、大規模集積回路プロセスへの Spin-JJ 融合についても基盤技術を確立した。

(2) 詳細

【研究テーマ A 「位相制御素子の作製・評価技術の構築」】

研究テーマ A に関しては、研究開始から半年間で窒化物 Spin-JJ における明瞭な 0 状態と π 状態の相転移を観測することに成功した(論文発表 1 及びプレスリリース 1)。具体的には、超伝導体に NbN、強磁性体に CuNi 合金を採用し、MgO(100)基板上へ真空を破らずに NbN/CuNi/NbN 多層膜を成膜することでクリーンな接合界面を有する Spin-JJ を作製した。0- π 転移を観測するためには接合の臨界電流値を測定する必要があるが、Spin-JJ は金属的なジョセフソン接合であるため臨界電流値以上の電流に対して発生する電圧が非常に小さく、通常のジョセフソン接合測定系では臨界電流値の測定が不可能である。そのため研究開始直後に、ナノボルトメータをベースとした極微小電圧測定系を構築し、精度良く Spin-JJ の臨界電流値の測定を可能とした。その結果、臨界電流の CuNi 膜厚依存性及び温度依存性において、0- π 転移を示唆するディップ構造を観測し(図 1)、微視的理論を用いた詳細な解析により 0- π 転移であることを実証した。また、0- π 転移 CuNi 膜厚近傍にある Spin-JJ の臨界電流に関して現れる低温側での飽和など特徴的な温度依存性も観測し、全て理論式によりコンシステントに説明できることを明らかにした。これにより、研究テーマ B に向けたコア技術の確立を研究開始から早い段

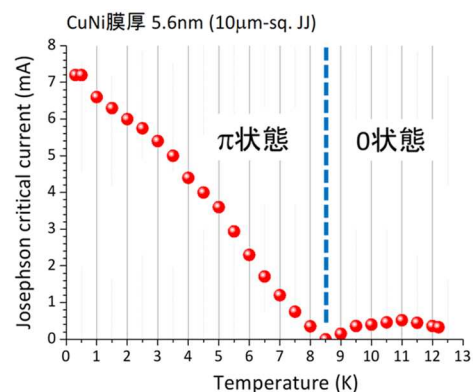


図 1. Spin-JJ における 0- π 転移。

階で行うことができた。その後、Spin-JJ に用いる基板として、誘電損の大きい MgO から Si への移行に挑戦した。ここでは、既に従来のジョセフソン接合で実績のある TiN バッファ層技術を採用した。量子ビットで一般的に用いられる高抵抗 Si 基板に特定の前処理を施した後、超高真空下で TiN を成膜することにより、TiN(100)が結晶配向する。TiN と NbN の格子定数は近いため、この TiN バッファ層上に NbN 及び NbN/AlN/NbN のエピタキシャル成長が可能となる。そこで本研究では、TiN/Si 基板上へ NbN/CuNi/NbN 接合を作製することで、量

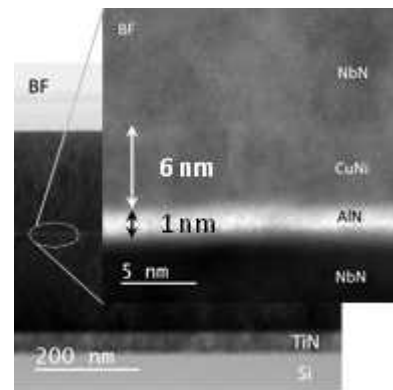


図 2. Spin-JJ の電子顕微鏡写真。

子ビットへ応用できる位相制御素子としての Spin-JJ 技術を確立した。MgO 同様、Si 基板上でも π 状態にあることは、後述の量子ビット測定に加え、Spin-JJ を含んだ超伝導ループにおける最大電流の磁場変調測定からも確認した。さらに将来的な技術として、Spin-JJ の NbN と CuNi 間に絶縁層 AlN を挿入することで準粒子トンネル等によるエネルギー散逸の抑制、つまり量子ビットの性能向上が期待されるため、NbN/CuNi/AlN/NbN 接合の作製も行い、これに成功した(図 2)。以上より、研究テーマ B の基盤となる位相制御素子の作製・評価技術の確立に成功し、本テーマの目的を達成した。

【研究テーマ B 「位相制御素子を組み込んだ磁束バイアスフリー量子ビットの実証」】

研究テーマ B に関しては、研究テーマ A で確立した窒化物 Spin-JJ の技術をベースとして、大きく分けて 2 種類のアプローチ・素子構造で研究を進めた。ひとつ目は、Spin-JJ を位相シフタとして機能する接合として利用し、量子ビットのエネルギー準位を決定する接合としては実績のある斜め蒸着法で作製した Al/AIO_x/Al 接合を用いる構造である。この NbN と Al のハイブリッド構造を実現するために、最初に TiN バッファ層付き Si 基板上に Spin-JJ を作製し、下部 NbN 層及び TiN 層を利用してコプレーナ導波路及び共振器、Al 接合とのコンタクト部を形成した。その後層間絶縁のために SiO₂ 層が必要となるが、一般的に酸化物は量子

ビット性能を劣化させるため、Al 接合を作製する前にフッ化水素酸より選択的にエッチングを行い除去した。最後に Al 接合を成膜・形成して Spin-JJ 量子ビットを作製した。図 3 に示すように、共振周波数を 9 GHz に設計したコプレーナ共振器に、Spin-JJ 付き/無し 2 種類の磁束型量子ビットが結合した構造を作製した。まず、作製

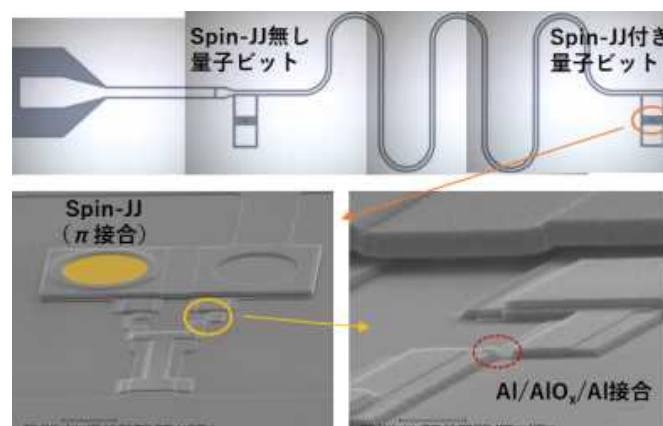


図 3. 作製した Spin-JJ 量子ビットの顕微鏡写真。

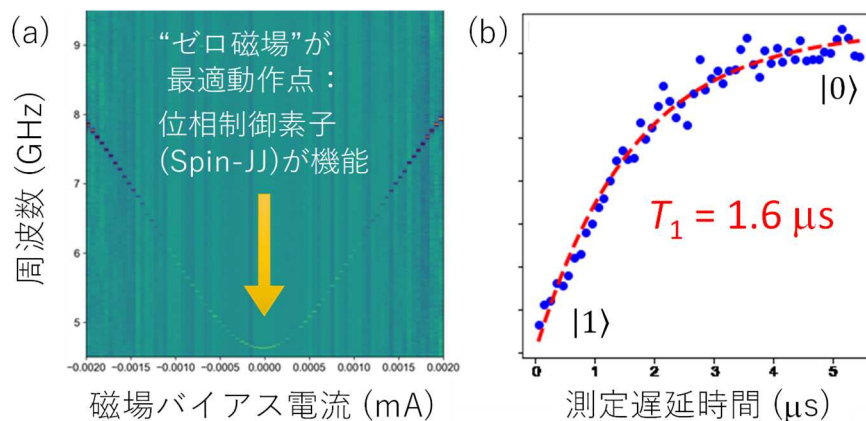


図 4. (a) Spin-JJ 量子ビットのスペクトロスコピー。(b) エネルギー緩和時間の評価。

した量子ビットのスペクトロスコピー(磁場依存性)の測定を行った。その結果 Spin-JJ 付き量子ビットに関して、図 4(a)に示すようにゼロ磁場においてエネルギー最小となる最適動作点が観測され、磁束バイアスフリー動作の実証に成功した(学会発表 1 他)。時間領域測定も行い、 π パルスにより励起状態へ量子ビットを励起してから一定の遅延時間の後に状態を測定した結果、図 4(b)に示すように励起状態から基底状態への緩和時間(エネルギー緩和時間, T_1)として $1.6 \mu\text{s}$ が得られた。Spin-JJ 無しの量子ビットに関しても同程度の T_1 が得られており、更なる性能向上を目指し設計及びプロセスの改善に取り組んでいる。以上により磁束バイアスフリー量子ビットの実現という本テーマの目的を達成することに成功した。

もうひとつのアプローチは、Spin-JJ を含む全接合を窒化物接合で構成する構造である。本テーマ開始当初は、3 つの絶縁層付き Spin-JJ による構造を作製したが、微小接合作製や特性制御の困難性に直面したため、位相シフタとして機能するひとつの Spin-JJ と、量子ビット接合としての NbN/AlN/NbN 接合を組み合わせる構造に方針転換した。その結果、スペクトロスコピー及び時間領域測定から、量子ビットとしての動作実証に成功した(学会発表 2 他)。磁束バイアスフリー動作については、オフセット磁場の存在によりまだ明確ではないため詳細に調査中である。一方で、同一基板上に作製した Spin-JJ は別実験により π 状態であることを確認しているため、測定系の見直し等により実証可能であると考えている。

【研究テーマ C 「位相制御素子を用いた超伝導論理回路の基盤技術構築」】

本テーマに関しては、まず超伝導論理回路のひとつである AQFP 回路へ Spin-JJ を導入することで、回路の小面積化につながることをシミュレーションにより示した(論文発表 2)。AQFP は超低消費電力性が特長であるため、冷却能力の限られたミリケルビンステージにおいても動作が期待でき、量子ビットの周辺回路応用が期待できる。また、SFQ 回路にも Spin-JJ 導入の検討を行い、位相制御の効果による静的な消費電力の削減が可能であることを示した。さらに、超伝導集積回路の豊富な実績をもつ産業技術総合研究所のファウンダリプロセス(CRAVITY)へ Spin-JJ を組み込む新しいプロセスを提案・検証し(学会発表 3 他)、CARVITY チップ上での位相制御動作を実証することに成功した。これらは量子ビットの周辺回路実現に向けた技術基盤となる成果である。以上から、本テーマについても目的は達成できたと考えている。

3. 今後の展開

本さがけ研究において Spin-JJ という超伝導位相制御素子を実現し、超伝導量子ビットの大規模化に向けた重要な基盤技術である、磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットの実証に成功した。これは超伝導量子計算分野へブレークスルーを与えたのみではなく、超伝導スピントロニクス
の新しいデバイス応用の可能性を切り拓いたことを意味する。今後は、まず Spin-JJ 量子ビットの素子性能(エネルギー緩和時間やコヒーレンス時間等)の向上を短い期間で達成し、その上で多数量子ビットから構成される集積量子回路の開発を目指す。さらに、量子ビットの周辺回路として超伝導論理回路へも Spin-JJ の導入を進め、更なる低消費電力化と集積化を可能とすることにより、量子回路と制御・読み出し回路を融合した、超伝導量子・古典ハイブリッド回路の実現を目指す。また、Spin-JJ 以外にも超伝導スピントロニクス技術による新奇な位相制御手法の開拓にも挑戦し、超伝導及びスピントロニクスデバイスの高性能化・高機能化を推進していく所存である。

4. 自己評価

まず研究目的の達成状況としては、研究開始からごく早い段階で Spin-JJ における π 状態を実証したことに加え、本研究最大の目的である磁束バイアスフリーな Spin-JJ 量子ビットの実証にも成功したため、明確に目的を達成できたと考えている。また超伝導論理回路への Spin-JJ 導入に関しても、シミュレーションによる優位性実証の他、集積回路プロセスとの融合に向けた基盤技術を構築できた。研究実施体制としては、Spin-JJ 技術開発に関しては前職場である国立研究開発法人・情報通信研究機構において研究代表者が作製から測定、解析まで全てを行った。名古屋大学へ異動後は、Spin-JJ 量子ビット開発や超伝導回路応用に関して研究代表者が中心となり学生や研究者とも適宜相談・協力しながら研究を推進した。途中研究環境の変化があったものの、さがけの支援のおかげもあり、研究進捗が滞ることなく効率良く研究を進めることができたと自負している。研究費の執行としては、主に Spin-JJ 及び量子ビットの作製に必須となる超伝導/磁性膜スパッタリング成膜装置の購入及び移設、素子特性評価システムを構成するマイクロ波源等の各種機器等の購入、素子作製に必要となる基板等の購入に使用した。科学技術及び社会・経済への波及効果としては、Google や IBM を筆頭として超伝導量子回路の大規模化競争が激化している状況において、本さがけで実証した磁束バイアスフリー量子ビット技術は、優れたスケラビリティや高い非調和性を有することから現在主流のトランズモン型量子ビットを置き換え得るポテンシャルを大いに秘めており、その将来的な波及効果は極めて大きいことが予想される。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Taro Yamashita, Akira Kawakami, Hirotaka Terai, “NbN-based 0 and π ferromagnetic Josephson junctions”, Physical Review Applied, 2017, vol. 8, pp. 054028–1–5.
2. Kota Arai, Naoki Takeuchi, Taro Yamashita, Nobuyuki Yoshikawa, “Adiabatic quantum-flux-parametron with π Josephson junctions”, Journal of Applied Physics, 2019, vol. 125, no. 9, pp. 093901–1–7.
3. Taro Yamashita, “Phase Shift and Control in Superconducting Hybrid Structures”, IEICE

Transactions on Electronics, 2018, vol. E101.C, no. 5, pp. 378–384.

4. Taro Yamashita and Hirotaka Terai, “Recent Progress in Ferromagnet/Superconductor Hybrid Structure and its Applications to Cryogenic Computing”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2016, vol. 136, no. 12, pp. 728–733.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【主要な学会発表】

1. Taro Yamashita, Kun Zuo, Yoshiro Urade, Qiu Wei, Hirotaka Terai, Akira Fujimaki, Yasunobu Nakamura, “Phase-shift flux qubit with ferromagnetic π junction”, 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th), Tsukuba, Japan, May 13–15, 2019.
2. Sunmi Kim, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Wei Qiu, Taro Yamashita, Ziqiao Ao, Koichi Semba, Hirotaka Terai, “NbN-based superconducting qubit on Si substrate”, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics 2019 (ISNTT2019), Atsugi, Japan, November 18–22, 2019.
3. Daiki Hasegawa, Yuto Takeshita, Kyosuke Sano, Masamitsu Tanaka, Taro Yamashita, Akira Fujimaki, “Magnetic Josephson junctions on Nb four-layer structure for half flux quantum circuits”, The 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2019), Riverside, USA, July 28–August 1, 2019.

【受賞】

1. 平成 29 年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞

【プレスリリース】

1. 「窒化ニオブを用いた磁性ジョセフソン素子を世界で初めて実現」

国立研究開発法人情報通信研究機構、2017 年 11 月 15 日.

URL: <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/15-1.html>