

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420306

研究課題名（和文）超低消費電力ナノスケール位相制御超伝導スピントロニック集積回路の研究

研究課題名（英文）Study on nanometer-scale phase-controlled superconducting spintronic integrated circuits with ultra-low-power dissipation

研究代表者

赤池 宏之（AKAIKE, HIROYUKI）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20273287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超伝導とスピンを組み合わせた超伝導スピントロニック集積回路の実現を目指し、その基本要素素子を開発した。さらに、将来の微細化に対応すべくNbTiN集積回路技術の確立を目指した。基本要素素子として、磁性パターンを用いた超伝導位相シフタを提案、その磁化制御法を確立するとともに小規模回路への適用を図った。磁性ジョセフソン接合では、集積回路応用上重要となる特性ばらつきの小さな接合を開発した。また、NbTiN集積回路作製上最も重要となるNbTiNジョセフソン接合作製技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed basic elements in superconducting spintronic integrated circuits and NbTiN-based Josephson junction technologies for future high-performance nanometer-scale superconducting integrated circuits. As the basic element, we proposed superconducting phase shift elements (PSEs) made of magnetic patterns and the methods for controlling the magnetization in the patterns. We also demonstrated reconfigurable single flux quantum circuits with PSEs. As another basic element, magnetic Josephson junctions were developed. We obtained pi-junctions with an initial phase difference of π ; and reasonable good uniformity in critical currents of the junctions.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導デバイス 超伝導集積回路 磁性材料 磁性ジョセフソン接合 デバイス作製技術 窒化物超伝導体

1. 研究開始当初の背景

超伝導単一磁束量子回路は、超伝導ループ内の磁束が量子化されるという超伝導現象の特徴を活かし、その1磁束量子分となる単一磁束量子(SFQ)を情報担体として用いる回路である。回路の構成に際しては、ジョセフソン接合を挟み込んだ超伝導ループを用い、入力信号に応じてジョセフソン接合をスイッチさせ、ループへのSFQの出入りを制御する。このSFQは時間幅数ps、波高値数mVの電圧パルスであるため、SFQ回路は高速動作性及び低消費電力性を大きな特長とする[1]。研究代表者らは、高速性の観点から120GHz動作のシフトレジスタ[2]や、45GHz動作プロセッサ[3]の作製に成功している。

一方、近年、SFQ回路技術における低電力性が、これまでも増して重要視されるようになってきた。これを受け、低電力性を追求した断熱的回路等の超低電力SFQ回路の検討が精力的になされている。ただし、これらの回路は従来の回路作製技術に基づくものであり、既存回路方式の延長線上に位置するものとなる。SFQ回路は、上にも述べたように、ジョセフソン接合と超伝導インダクタンスにより構成される超伝導ループを用い、それに蓄えられる磁束量子 Φ_0 を利用する。そのため、必然的に回路の縮小化が制限される。特に、超低電力回路は電力削減のため臨界電流 I_c の小さなジョセフソン接合を使うため、 $LI_c \sim \Phi_0$ の制限(L:超伝導ループのインダクタンス)からループサイズが大きくなってしまふ。さらに、超伝導回路のシステム化に不可欠な大容量メモリも、このループの制限のためセルの小型化が困難となり、現時点存在しない。

そこで、研究代表者らは、本研究において、従来技術の延長ではなく、新しい試みとして、磁性材料の導入を検討した。磁性材料の持つ磁化を利用することにより、超伝導ループを持たない超伝導磁性メモリや、超伝導位相シフトを実現できる。超伝導位相シフトとは、超伝導巨視的波動関数の位相をシフトさせる素子である。超伝導ループ内の Φ_0 は巨視的波動関数の位相2分に相当し、ループのL及びそこを流れる周回電流により Φ_0 が保持されるが、超伝導位相シフトを用いれば位相を稼ぐことができ、その分Lを小さくできる。回路の小型化が可能となる。さらに、超伝導位相シフトの位相シフト効果を制御すれば、SFQ回路の論理動作の切替を実現することが可能となる。また、SFQ回路駆動電流の低減も期待でき、回路の低電力化も可能となる。本研究では、超伝導位相シフトとして、磁性パターンの磁化を利用する素子、及び強磁性(F)層を障壁層として持つ磁性ジョセフソン接合の検討を行った。後者の磁性ジョセフソン接合は、F層の膜厚を変化させることにより、通常の初期位相差0のジョセフソン接合(0接合)と、初期位相差の接合を実現することができ、接合はシフトとして機能する。

能する。

本研究は、以上のように、磁性材料導入による超伝導位相シフトの実現とそれを実際の回路に適用した位相制御超伝導スピントロニック集積回路の可能性を調査するものである。さらに、将来の高集積化・高密度化を考えたとき、従来の回路に用いられる超伝導体Nbではなく、より適した超伝導材料導入の検討も行う。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導集積回路の高機能化、高性能化を実現すべく、超伝導とスピンを融合させた位相制御超伝導スピントロニック集積回路の基礎的研究を行い、その実現可能性を評価する。具体的には、位相制御を目的とした磁性パターンによる超伝導位相シフト技術の確立、接合単体で位相差を実現する磁性障壁ジョセフソン接合の作製及び評価、将来のナノスケール化を可能とするデバイス技術としての窒化物超伝導体をベースとした集積回路技術の検討を行う。

3. 研究の方法

本研究の主要な項目は、以下の3つとなる。

(1)磁性パターンによる超伝導位相シフトの提案とその応用

磁性パターンの持つ磁化が発する磁束を回路内の超伝導ループに鎖交させることにより、超伝導ループ内の位相をシフトさせることが可能となる。従って、磁性パターンの磁化の強さや方向を制御することにより、超伝導位相シフトが実現する。ここでは、磁性材料として希釈磁性であるPdNiを用い、その磁化制御法の検討、及び磁性パターンによる超伝導位相シフトのSFQ回路への応用を検討した。

(2)磁性障壁を持つジョセフソン接合の作製とその評価

磁性障壁を持つジョセフソン接合の特徴は、接合に電流の流れていない基底状態において、位相差 π を持つ π 接合を実現することができる点である。ここでは、将来的に、磁性ジョセフソン接合を回路内のスイッチング素子として使用することを想定し、超伝導(S)層-磁性(F)層-絶縁(I)層-超伝導(S)層構造を持つSFIS接合を作製・評価した。F層にはPdNiを用い、S及びI層にはNb及びAlOxを用いた。接合としての動作の実証及び集積回路応用に不可欠な接合特性の均一性を評価した。

(3)窒化物超伝導体による超伝導集積回路技術の開発

現在の超伝導集積回路は、作製プロセスの高信頼性の観点からNbを用いた回路となっている。しかし、Nbは超伝導コヒーレンス長が約40nm程度であり、微細化の限界として線幅0.2 μ m程度となる。将来のナノスケール

ルレベルの高集積化を考えたとき、微細化しても十分な超伝導性を示す材料が必要である。そこで、本研究では、コヒーレンス長が5nm程度である窒化ニオブ系超伝導体に着目した。また、この材料は、臨界温度(T_c)がNbに比べて高く、Nb系回路の4K動作に対して8-10K動作が可能となるため、回路あるいはシステムの冷却コストの低減に繋がるという長所もある。本研究では、下地材料に依存しないNbTiNを用い、回路の基本構成要素となるジョセフソン接合、及びシートインダクタンスの評価を行った。

4. 研究成果

(1)磁性パターンによる超伝導位相シフトの提案とその応用

PdNi磁性パターンの超伝導位相シフトとしての機能を評価するために、接合単体及び超伝導量子干渉素子(SQUID)を用い、位相シフト量の評価を行った。位相シフトとして利用するためには、磁性パターン中の磁化の制御が重要である。第一段階として、冷却中に外部磁場を印加する方法(有磁場冷却)を用い、磁化の制御の確認及び位相シフト効果について明らかにした。また、SFQ回路への応用として、回路内に磁性パターンを配置し(図1)その磁化方向を制御することにより、回路の機能切替えの動作実証に成功した。ただし、この外部磁場による方法は、超伝導回路が作製されたチップに対して、印加磁場の方向が一方に制限される。従って、チップ上の磁性パターン中の磁化方向は一方のみとなる。それに対し、回路に多数の磁性パターンを配置し、それぞれの磁化方向を個別に制御するという応用が大規模化に関して重要となる。これを実現する方法として、直交する2方向の制御線を用いた電流誘起磁場を利用する方法を提案し、原理実験に成功した。これまでに、本手法を用いて、SFQ回路による2入力1出力ルックアップテーブルを実現し、論理機能切替えと50GHzを超える高速動作を実証した。今後は、より規模の大きな回路への適用とその有効性の評価が必要となる。

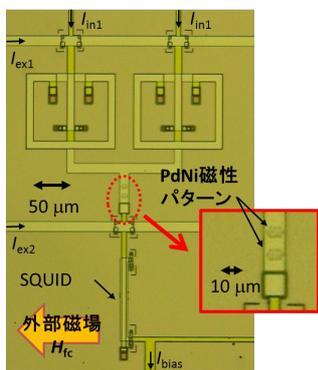


図1. 磁性パターンを搭載したSFQ回路(磁束量子パラメトロン回路)

(2)磁性障壁を持つジョセフソン接合の作製とその評価

マルチチャンバー成膜装置を用いて、Nb/PdNi/AlOx/Nb積層膜を成膜し、接合を作製した。PdNi層は、Ni11%のものを用い、膜厚を変化させた。AlOxはAlを堆積後、表面を熱酸化することにより形成した。接合特性は4.2Kで評価した。接合の0接合あるいは接合としての振る舞いは、3接合-SQUIDを用い(図2)その臨界電流(I_c)の制御電流(I_{ctl})依存性を評価することにより決定した。図3は、PdNi層9nmの特性である。特性がちょうどに相当する分だけ、シフトしていることを確認し、接合が接合であることを確認した。PdNi11nmの接合でも同様な特性が得られた。一方、7nm以下のものでは、0接合となった。集積回路応用上、重要となる接合特性の均一性については、 I_c のばらつきにおいて、9nmまで標準偏差 1σ が1.2%以下であり、集積回路応用上の目安となる2.0%以下を満たすことが分かった。今後は、接合の臨界電流密度(J_c)の向上等、さらなる接合特性データの蓄積が重要となる。

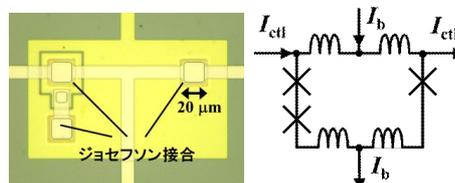


図2.3接合SQUIDの写真と等価回路

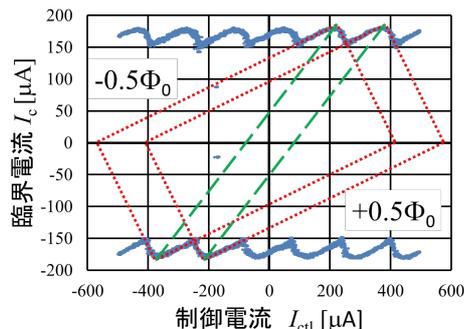


図3. PdNi7nm時の3接合SQUIDの特性

(3)窒化物超伝導体による超伝導集積回路技術の開発

NbTiN薄膜作製には、反応性スパッタリング法を用いて行い、成膜条件を検討することによりSi基板上で $T_c=14.7K$ のものまで得ることに成功した。接合作製に関しては、これまでに実績のあるAlN_xトンネル障壁層[4]を用いて行った。その結果、図4に示すような、 I_c の均一性に優れた接合特性の実現に成功した。 I_c のばらつきの温度依存性については、10Kまで1.6%以下を達成した。また、接合の J_c については、現時点で6kA/cm²まで制御できることを見出している。 J_c については、[4]にあるように $J_c \sim 20kA/cm^2$ までは達成できるものと考えている。

NbTiN を SFQ 回路に応用する際には、配線のインダクタンスが重要となる。NbTiN は Nb に比べて磁場侵入長が長く、シートインダクタンスが大きくなるため、回路の高集積化が可能である。そこで SQUID を作製し、インダクタンス評価を行った結果、Nb に比べて 1.5 倍程度のシートインダクタンスの増加を確認し、集積度も同程度向上することが分かった。

今後は、NbTiN を用いて回路を作製し、Nb に対する優位性を示すことが課題となろう。

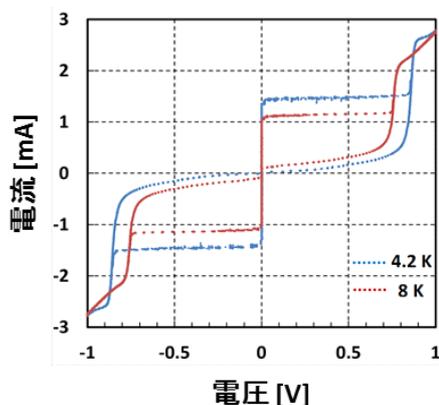


図 4. 200 接合の電流電圧特性

<引用文献>

- K.K Likharev et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 1, pp.3, 1991
 H. Akaike et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 19, pp. S320–S324, 2006
 A. Fujimaki et al., IEICE Trans. on Electron., vol. E97-C, pp. 157, 2014
 H. Akaike et al., IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 23, pp. 1101306, 2013

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

- S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, S. Kurokawa, M. Tanaka, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Investigation into the individual configuration of superconducting phase shift elements made of ferromagnetic patterns for reconfigurable circuits,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, pp. 1501204, 2017. 査読有 DOI:10.1109/TASC.2016.2642054
 H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Fabrication of superconductor–ferromagnet–insulator–superconductor Josephson junctions with critical current uniformity applicable to integrated circuits,” Applied Physics Express, vol. 10, no. 3, pp. 033101, 2017. 査読有 DOI:10.7567/APEX.10.033101

伊藤大, 谷口壮耶, 黒川綜太, 田中雅光,

赤池宏之, 藤巻朗: “強磁性パターンを用いた磁束量子パラメトロン論理機能切り替え,” 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), vol. 136, no. 12, pp. 753–758, 2016.

2016 年, 査読有 DOI:10.1541/ieejfms.136.753

H. Akaike, S. Sakamoto, K. Munemoto, and A. Fujimaki: “Fabrication of NbTiN/Al–AlN_x/NbTiN Josephson Junctions for Superconducting Circuits Operating around 10 K,” IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.26, no. 5, pp.1100805, 2016. 査読有 DOI:10.1109/TASC.2016.2565613

H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, H. Akaike, A. Fujimaki: “Electrical Characteristics of Nb Based Superconductor–Ferromagnet–Insulator–Superconductor Josephson Junctions,” IEEE Proceedings of 2015 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC) in IEEE Xplore® Digital Library, DP-O04, 2015. 査読有 DOI:10.1109/ISEC.2015.7383454

S. Kurokawa, A. Tsune, H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, M. Tanaka, H. Akaike, A. Fujimaki: “Reconfigurable Logic Gate of Quantum-Flux-Parametron Using Magnetic Material,” IEEE Proceedings of 2015 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC) in IEEE Xplore® Digital Library, DS-P27, 2015. 査読有 DOI:10.1109/ISEC.2015.7383477

T. Wakamura, H. Akaike, Y. Omori, Y. Niimi, S. Takahashi, A. Fujimaki, S. Maekawa, Y. Otani: “Quasiparticle-mediated spin Hall effect in a superconductor,” Nature Materials, 14, pp. 675–678, 2015. 査読有 DOI:10.1038/nmat4276

S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Cryogenic ferromagnetic patterns with controlled magnetization for superconducting phase-shift elements Japanese,” Journal of Applied Physics, Vol. 54, pp. 043101, 2015 査読有 DOI:10.7567/JJAP.54.043101

[学会発表](計 42 件)

S. Taniguchi, H. Ito, T. Kurihara, M. Tanaka, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Evaluation of a SFQ look-up table based on superconducting phase shift elements for reconfigurable circuits,” 10th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2017), Nagoya University (Nagoya), Japan, Feb. 20–21, 2017.

H. Ito, S. Taniguchi, T. Kurihara, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Evaluation of critical current uniformity of 0- π josephson junctions with ferromagnetic layers,” 10th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2017), Nagoya University (Nagoya), Japan, Feb. 20–21, 2017

S. Taniguchi, H. Ito, T. Kurihara, M. Tanaka, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Implementation of a look-up table based on phase shift elements and dual-rail SFQ circuits,” 29th Int. Symp. Supercond. (ISS 2016), Tokyo International Forum (Tokyo), Japan, Dec. 13–15, 2016

S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, S. Kurokawa,

M. Tanaka, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Investigation on the individual configuration method of superconducting phase shift elements made of ferromagnetic patterns,” 2016 Applied Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, CO(USA), Sep. 4-9, 2016.

H. Akaike, S. Sakamoto, K. Munemoto, and A. Fujimaki: “Inductance evaluation of NbTiN wires for superconducting circuits,” 2016 Applied Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, CO (USA), Sep. 4-9, 2016

H. Ito, S. Taniguchi, S. Kurokawa, K. Ishikawa, T. Kurihara, M. Tanaka, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Operation of adiabatic quantum flux parametron logic circuits based on π phase shift elements with ferromagnetic material,” 2016 Applied Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, CO (USA), Sep. 4-9, 2016.

S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, S. Kurokawa, A. Tsune, M. Tanaka, H. Akaike, A. Fujimaki: “Programmable single-flux-quantum circuits based on superconducting phase shift elements made of ferromagnetic patterns,” The 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), Lyon convention center (Lyon, France) Sep. 6-10, 2015

H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, H. Akaike, A. Fujimaki: “Josephson junctions with a PdNi ferromagnetic barrier layer for integrated circuits,” The 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), Lyon convention center (Lyon, France), Sep. 6-10, 2015

H. Akaike, S. Sakamoto, K. Munemoto, A. Fujimaki: “Fabrication of NbTiN/Al-AlN_x/NbTiN Josephson Junctions for Single-Flux-Quantum Circuits Operating around 10 K,” The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), Nagoya University (Nagoya, Japan), Jul. 6-9, 2015.

H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, H. Akaike, A. Fujimaki: “Electrical characteristics of Nb based Superconductor-Ferromagnet-Insulator-Superconductor Josephson junctions,” The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), Nagoya University (Nagoya, Japan), Jul. 6-9, 2015

S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, S. Kurokawa, A. Tsune, M. Tanaka, H. Akaike, A. Fujimaki: “Application of Superconducting Phase Shift Elements Made of Ferromagnetic Patterns to Single-Flux-Quantum Circuits for Reconfigurable Functions,” The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), Nagoya University (Nagoya, Japan), Jul. 6-9, 2015

S. Kurokawa, A. Tsune, H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, M. Tanaka, H. Akaike, A. Fujimaki: “Reconfigurable Logic Gate of Quantum-Flux-Parametron Using Magnetic

Material,” The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), Nagoya University (Nagoya, Japan), Jul. 6-9, 2015

S. Taniguchi, H. Ito, K. Ishikawa, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Evaluation of Magnetic Field Induced by PdNi Ferromagnetic Patterns for Phase Shift Elements,” 7th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2014), NiCT (Kobe, Japan), Dec. 1-2, 2014

S. Sakamoto, K. Munemoto, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Fabrication of All NbTiN Josephson Tunnel Junctions for Single-Flux-Quantum Circuits,” 7th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2014), NiCT (Kobe, Japan), Dec. 1-2, 2014

H. Ito, S. Taniguchi, K. Ishikawa, H. Akaike, and A. Fujimaki: “Effects of PdNi Ferromagnetic Interlayers in Nb based Josephson Junctions,” 7th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2014), NiCT (Kobe, Japan), Dec. 1-2, 2014

S. Kurokawa, A. Tsune, K. Ishikawa, S. Taniguchi, H. Ito, M. Tanaka, H. Akaike, A. Fujimaki: “Low-Excitation-Current Operation of Quantum-Flux-Parametron Circuit Using Magnetic Flux Biasing,” 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), Funabori (Tokyo, Japan), Nov. 25-27, 2014

〔その他〕

ホームページ等

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

赤池 宏之 (AKAIKE, Hiroyuki)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20273287

(2)連携研究者

藤巻 朗 (FUJIMAKI, Akira)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20183931