

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04280

研究課題名(和文)パイ遷移ジョセフソン接合を含む新しい超伝導集積回路の設計法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of design methodology of superconducting integrated circuit containing pi-shifted Josephson junctions and its applications

研究代表者

山梨 裕希 (Yamanashi, Yuki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70467059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導回路は数十GHzのクロック周波数で超低電力な動作が可能であり、次世代の回路技術として注目を集めている。超伝導回路の性能をさらに向上させる方法にパイ遷移ジョセフソン接合の導入がある。本研究ではパイ遷移ジョセフソン接合を含む回路構成法を検討し、あらゆる論理ゲートを設計できる方法を見出した。パイ遷移ジョセフソン接合を含む回路を解析できる回路シミュレータを用いた評価で、相補出力非破壊読み出しゲートが従来回路の半分以下の回路面積で実装できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、超伝導回路のさらなる性能向上が可能になった。特に相補出力型の論理ゲートの大幅な小面積化と性能向上は、大規模なデジタル回路に欠かせないデコーダ回路の性能向上につながり、超伝導回路によるランダムアクセスメモリの大幅な小面積化も可能になった。開発したパイ遷移ジョセフソン接合を含む回路の解析ができる回路シミュレータは公開し、国内外の研究者に利用されている。

研究成果の概要(英文)：A superconductor circuit can operate at the frequency of tens GHz with extremely low power consumption. The performance of the superconductor circuit can be improved by introducing pi-shifted Josephson junctions. We developed a design methodology for the superconducting circuits that enables us to design any logic gates with pi-shifted Josephson junctions. We developed an analog circuit simulator for the circuits that contain pi-shifted Josephson junctions. We found that the non-destructive read-out logic gate that contains pi-shifted Josephson junctions can be implemented with less than half of circuit area of the conventional circuit.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：パイ遷移ジョセフソン接合 単一磁束量子回路

1. 研究開始当初の背景

超伝導素子をスイッチング素子とする超伝導集積回路は、超高速かつ超低電力な動作が可能であり、さまざまな応用が検討されている。近年素子化がなされるようになってきたパイ遷移ジョセフソン接合は、ジョセフソン接合と双対な特性を持ち、両者を用いることで超伝導回路の大幅な簡略化、性能向上や新しい機能の付加が期待される。特定の回路、主にトグルフリップフロップにおいてパイ遷移ジョセフソン接合による超伝導電子の巨視的な波動関数の位相の静的シフトを用いた小面積化、供給バイアス電流量の低減による低消費電力化がなされてきた。しかし、数多くの種類がある超伝導フリップフロップを、パイ遷移ジョセフソン接合とジョセフソン接合を用いてどのように構成するか、どのように性能向上ができるかが明らかでなかった。

2. 研究の目的

パイ遷移ジョセフソン接合を用いた超伝導回路、特にフリップフロップの設計理論を構築する。これによりあらゆるフリップフロップがパイ遷移ジョセフソン接合を用いて設計できるようになる。設計したフリップフロップの性能を定量的に評価し、パイ遷移ジョセフソン接合を用いることでどこまで超伝導回路の性能を向上できるかを明らかにする。パイ遷移ジョセフソン接合を用いた回路が有効な応用を明らかにする。

3. 研究の方法

パイ遷移ジョセフソン接合を用いた回路設計法の確率のために、超伝導フリップフロップの構成に不可欠な超伝導磁束保持ループを超伝導電子の巨視的な波動関数の位相を用いて理論的に解析し、超伝導磁束保持ループの構成法を明らかにした。同時に供給バイアス電流がどこまで減らせるか、超伝導磁束保持ループのインダクタンスがどこまで減らせるかを明らかにした。

パイ遷移ジョセフソン接合を用いた回路の定量評価のために、パイ遷移ジョセフソン接合を含む回路の過渡解析が可能なアナログ回路シミュレータを開発した。

構築した回路設計論を用いて、様々な超伝導フリップフロップを設計した。設計した回路は開発したアナログ回路シミュレータを用いて動作を確認し、電源電圧マージンや素子パラメータマージンを評価した。

4. 研究成果

超伝導回路では、超伝導磁束保持ループ中の磁束量子の有無でバイナリ信号を表現する。超伝導磁束保持ループにおける超伝導電子の巨視的な波動関数の位相量子化条件から、パイ遷移ジョセフソン接合をどのように構成するかを検討した。図 1 にパイ遷移ジョセフソン接合とジョセフソン接合によって構成される超伝導磁束保持ループの等価回路図と、論理値 '0' と '1' の表現法を示す。通常の超伝導回路における磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) の有無による '0' '1' 表現とは異なり、パイ遷移ジョセフソン接合の静的位相シフトにより、超伝導磁束保持ループを貫く半磁束量子 $0.5\Phi_0$ の向きによって '0' '1' 表現が可能になる。情報表現に必要な、ループ中に保持する磁束量が半分になるため、図 1 のようなパイ遷移ジョセフソン接合を含む超伝導磁束保持ループでは、磁束を保持するためのインダクタンスの値を減らすことができ、回路面積の低減が可能になる。さらに通常の超伝導磁束保持ループに必要な非対称なバイアス電流の供給をすることなく、ポテンシャルエネルギーに 2 個の極小点 (それぞれ論理 '0' '1' を表す状態に対応) を作り出すことができるため、低消費電力の回路を作ることができる。超伝導回路においてフリップフロップを構成するには、超伝導磁束保持ループが必要であり、図 1 に示した超伝導磁束保持ループを用いることで、小面積かつ低電力な超伝導フリップ

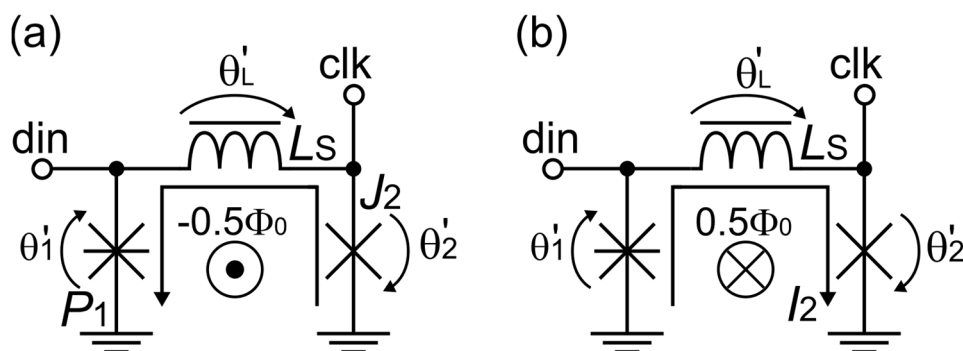


図 1 パイ接合 (P_1) とジョセフソン接合 (J_2) で構成される超伝導磁束保持ループにおける(a)論理'0'と(b)論理'1'の表現。

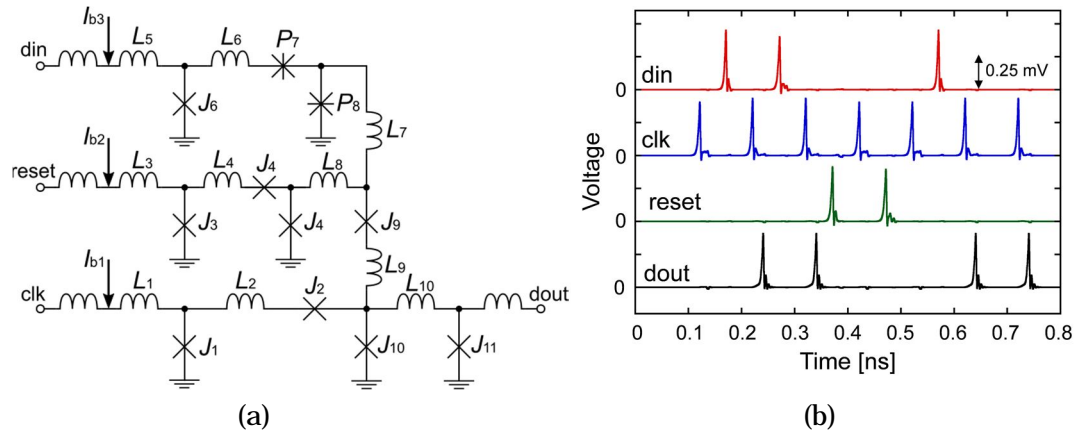


図2 パイ遷移ジョセフソン接合 (P_7 , P_8) を含む超伝導 AND ゲートの等価回路図(a)と回路シミュレーション結果(b)。

フロップを構成できる。

超伝導回路の設計やシミュレーションにはジョセフソン接合の特性を模擬した過渡解析が実行できるアナログ回路シミュレータが用いられている。これらの従来の超伝導回路シミュレータを用いてパイ接合の動作を模擬するための等価回路モデルも提案されている。しかし等価回路モデルを用いたシミュレーションでは、パイ接合の過渡特性を通常のジョセフソン接合を用いて計算することから、条件によって誤差が蓄積する。さらにインダクタンスと電流源から成る等価回路モデルの使用によって回路素子数が増えることから、従来シミュレータの使用には計算資源の浪費や計算時間の増大という問題もある。本研究ではジョセフソン接合とパイ接合が混在する超伝導回路のシミュレーションのために、パイ接合の動作を模擬できるアナログ回路シミュレータを作成した。作成した回路シミュレータを用いてパイ遷移ジョセフソン接合を含む回路が定量的に評価できるようになった。回路パラメータのばらつきや、熱雑音を考慮した回路特性の評価も可能になり、回路歩留まりを評価した結果、パイ接合を用いた超伝導磁束保持ループを用いた超伝導フリップフロップでは、その対称的な回路構造を反映して、歩留まりが通常のジョセフソン接合のみで構成される回路よりも高くなることが示された。

パイ遷移ジョセフソン接合を含む超伝導磁束保持ループを用いて、様々な超伝導フリップフロップを設計し、開発した回路シミュレータを用いて設計回路の評価を行った。図2に設計したANDゲートの等価回路と回路シミュレーション結果を示す。設計したすべての回路で、パイ遷移ジョセフソン接合を含む超伝導磁束保持ループの構造の対称性と低電力性により、ジョセフソン接合のみで構成される従来回路に比べて動作マージンが拡大すること、消費電力が低減できることを確認した。

さらにパイ遷移ジョセフソン接合を含む超伝導磁束保持ループの構造の対称性を使うと、相補出力を持つ相補型論理ゲートが極めて簡単に実現できることがわかった。従来回路では相補出力のために2個の超伝導磁束保持ループが必要であるのに対し、パイ遷移ジョセフソン接合を用いた回路では1個のみの超伝導磁束保持ループで相補出力を作り出せることを見出した。これによりパイ遷移ジョセフソン接合を含む相補出力非破壊読み出しゲートは従来回路のおよそ1/3の回路面積で実装することができることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamanashi Yuki, Nakaishi Sotaro, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Simulation of the Margins in Single Flux Quantum Circuits Containing π -Shifted Josephson Junctions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2904700	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sanada Akiyoshi, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Study on Single Flux Quantum Floating-Point Divider Based on Goldschmidt's Algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2902800	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okuma Yukihiko, Takeuchi Naoki, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Miniaturization of adiabatic quantum-flux-parametron circuits by adopting offset buffers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065007 ~ 065007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6668/ab1672	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomitsuka Yuma, Yamanashi Yuki, Zen Nobuyuki, Ohkubo Masataka, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Demonstration of Picosecond Time Resolution in Double-Oscillator Time-to-Digital Converter Using Single-Flux-Quantum Circuits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2902478	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamanashi Yuki, Nakaishi Sotaro, Sugiyama Akira, Takeuchi Naoki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Design methodology of single-flux-quantum flip-flops composed of both 0- and π -shifted Josephson junctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105003 ~ 105003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aad78d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamanashi Yuki, Imai Hibiki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 28
2. 論文標題 Influence of Magnetic Flux Trapped in Moats on Superconducting Integrated Circuit Operation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2018.2836971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayama Hiroshi, Takeuchi Naoki, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 1054
2. 論文標題 A random-access-memory cell based on quantum flux parametron with three control lines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012063 ~ 012063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1054/1/012063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hosoya Takuya, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Compact Superconducting Lookup Table Composed of Two-Dimensional Memory Cell Array Reconfigured by External DC Control Currents	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3049771	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asada Shunta, Yamanashi Yuki, Yoshikawa Nobuyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Demonstration of an efficient single flux quantum logic circuit by introducing a local magnetic flux biasing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 055007 ~ 055007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abf23a	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Y. Yamanashi
2. 発表標題 Performance Improvement of Superconducting Circuit by Introducing pi-Shifted Josephson Junctions
3. 学会等名 32nd International Superconductivity Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamanashi, A. Sanada, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Measurement of Single-Flux-Quantum Floating-Point Divider Based on Goldschmidt's Algorithm
3. 学会等名 International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tsuna, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Investigation of the effects of 1/f noise on superconducting circuits
3. 学会等名 International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Z. Li, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Single-Flux-Quantum Parallel Multiplier Using Accumulator Unit
3. 学会等名 32nd International Superconductivity Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tsuna, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Numerical and Experimental Analysis of Influences of $1/f$ noises on Superconducting Integrated Circuits
3. 学会等名 32nd International Superconductivity Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津名 宥佑, 山梨 裕希, 吉川 信行
2. 発表標題 超伝導回路の動作安定度に対する $1/f$ 雑音の影響の解析と評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細谷 岳哉, 山梨 裕希, 吉川 信行
2. 発表標題 外部からの磁束印可によるデータ入力可能な単一磁束量子メモリセルの設計とルックアップテーブルへの応用
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅田峻汰, 山梨裕希, 吉川信行
2. 発表標題 局地磁束バイアスを用いた超伝導単一磁束量子論理ゲートの動作実証
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細谷岳哉, 山梨裕希, 吉川信行
2. 発表標題 外部磁束印可によってデータの再構成が可能なメモリセルを用いた単一磁束量子ルックアップテーブルの動作実証
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小原佑亮, 山梨裕希, 吉川信行
2. 発表標題 パイ遷移ジョセフソン接合を用いた二線式超伝導単一磁束量子論理ゲートの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yamanashi, S. Nakaishi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Evaluation of Single Flux Quantum Flip-Flops Containing p-Shifted Josephson Junctions
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Sanada, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Study on Single Flux Quantum Floating-Point Divider Based on a Goldschmidt's Algorithm
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (ASC) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yamanashi
2. 発表標題 Superconducting Digital Data Processing Circuits for Astronomical Applications
3. 学会等名 19th East Asia Sub-millimeter-wave Receiver Technology Workshop 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Tsuna, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Simulation of superconductor circuit operation considering 1/f noises
3. 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Yamaguchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa
2. 発表標題 Investigation of Superconducting Neural Network Realizing Arbitrary Logic Function
3. 学会等名 12th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅田峻汰, 山梨裕希, 吉川信行
2. 発表標題 局地磁束バイアスを用いた超伝導単一磁束量子回路の設計と評価
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口大貴, 山梨裕希, 竹内尚輝, 吉川信行
2. 発表標題 磁束量子パラメトロンを用いた超伝導ニューラルネットワークによる任意出力可能な論理ゲートの設計と評価
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------