

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14248

研究課題名(和文) 論理的・物理的完全可逆回路を用いた逆問題計算機の創生

研究課題名(英文) Creation of Inverse Problem Computers based on Physically Reversible Logic Circuits

研究代表者

吉川 信行 (YOSHIKAWA, NOBUYUKI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70202398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：可逆回路は計算における情報のエントロピーが不変で双方向に論理演算が可能な回路であり、演算エネルギーの熱力学的限界であるLandauer 限界を超える超低消費電力での論理演算が可能であることが知られている。本研究では我々が提案した可逆断熱量子磁束パラメトロン(AQFP)を利用することで、逆問題の計算を低消費電力で実行できる計算機の創生を目指す。我々は可逆AQFP多数決ゲートを用いて可逆加算器を設計・試作し、回路の正常動作を実験により検証した。また、可逆ゲートを用いた可逆演算回路の消費エネルギーの数値解析を行い、これらの回路がLandauer限界を超える超低消費電力で動作することを示した。

研究成果の概要(英文)：Reversible logic circuits can perform logic operation bidirectionally without change of the entropy of the information, and are known as extremely energy-efficient logic whose power consumption can be well below the thermodynamic limitation called the Landauer's limit. In this study we aimed to create inverse problem computers with high-energy efficiency by using reversible adiabatic-quantum-flux-parametron (AQFP) circuits, which were proposed in our group previously. We have designed and implemented a reversible full adder using reversible AQFP majority gates and verified its correct operation. We have also numerically evaluated the energy consumption of the reversible full adder and shown that its bit energy can be reduced lower than the Landauer's limit.

研究分野：電子工学、超伝導エレクトロニクス、集積回路工学

キーワード：低消費電力 可逆回路 断熱回路 超伝導集積回路 ジョセフソン集積回路 逆問題

1. 研究開始当初の背景

データセンタなどの近年のハイエンド情報機器の爆発的な消費エネルギーの増大に対して、今後の情報化社会の発展のためにはその抜本的な省エネルギー化を可能とする革新的新技術の創生が重要な社会的課題である。

1ビットの論理演算におけるエネルギー下限値の存在は古くから議論されているが、Landauer によれば1ビットの情報の消去に対して最低 $k_B T \ln 2$ のエネルギーが消費される[1]。また、エントロピーが保存される可逆回路においては、演算に伴うエネルギー消費がないことが予言されている。可逆回路とは、入力データから出力をあるいは出力データから入力を双方向に演算可能な回路である。最近になって情報の消去に対する Landauer 限界の存在が実験的検証された[2]。また我々は、断熱型量子磁束回路(AQFP 回路)と呼ばれる論理回路を用いることで、論理的にも物理的にも可逆性を持つ完全可逆論理ゲートの動作実証を世界に先駆けて行った[3]。可逆AQFP 回路は、最新の CMOS に対して6桁以上の省エネルギー性を持っている。

2. 研究の目的

本研究では可逆断熱型量子磁束パラメトロン(AQFP) 回路を利用することで、原理的に解法が困難な逆問題の計算を高効率かつ低消費電力で実行できる逆問題計算機を創生する。本原理に基づいて加減算・乗除算可逆演算や逆行列演算を行う逆問題計算機を実現し、可逆回路を用いた逆問題計算機の有効性を示す。

3. 研究の方法

本研究の主な研究課題は、可逆AQFP ゲートを用いた加減算・乗除算回路の実現と、可逆AQFP ゲートの逆問題演算回路への展開である。研究では、まずに関連して、我々が提案した可逆AQFP 多数決回路において、論理演算の可逆性と消費エネルギーとの関係を数値解析により調べる。可逆AQFP 論理ゲートを構成するジョセフソン接合の位相の時間依存性を調べ、各接合の位相変化が論理演算の時間反転に対して可逆であることを示す。

次に可逆AQFP ゲートを用いた加減算・乗除算回路の実現を目指す。これまでに開発した可逆AQFP 多数決回路を用いて可逆加減算、乗除算器を設計・試作する。

については、可逆AQFP ゲートを用いた逆行列計算アルゴリズムを検討する。可逆回路を用いて出力データから入力を計算する逆行列計算機を検討する。

4. 研究成果

可逆AQFP 回路において、論理演算の可逆性と消費エネルギーとの関係を数値解析により調べた。まず、可逆AQFP 論理ゲートを

構成するジョセフソン接合の位相の時間依存性を調べ、各接合の位相変化が論理演算の時間反転に対して可逆であることを示した。このことは、提案した可逆AQFP 論理ゲートが、論理的にも物理的にも可逆であることを示している。また、これらの回路の演算速度を減少させることで、演算のエネルギーを Landauer 限界以下のエネルギーに下げられることを数値解析により示した。一方、作為的に論理演算における情報エントロピーを消去したAQFP 論理ゲートでは、論理演算に際して Landauer 限界よりも大きなエネルギー消費が起こることを明らかにした。以上の成果は、論理ゲートの論理的、物理的可逆性が論理回路の消費電力を下げる上で非常に重要であることを示すものである。

図1に可逆AQFP ゲートの回路図を示す。可逆AQFP ゲートはAQFP 回路で構成された3つの3入力多数決(MAJ) ゲートと3つの3出力分岐(SPL) ゲートで構成される3入力3出力の可逆論理ゲートである。ここで、3入力 a, b, c に対するMAJゲートの出力論理関数は、 $MAJ(a, b, c) = ab + bc + ca$ である。

図2にRQFPゲートを用いた可逆全加算器(RFA)の回路図を示す。RFAは3入力4出力の論理ゲートであり、可逆AQFPゲートを2つ用いることで構成できる。出力 s, c_{out} はそれぞれ和と桁上げを表している。また、入力論理と出力論理が1対1に対応しているためRFAは論理的可逆である。実際に設計した接合数は28接合であり、AQFP回路で構成した非可逆の全加算器(AQFP FA)と比較して6接合減らすことができた。

産業技術研究所の高速標準ジョセフソンプロセス(HSTP)を用いてRFAの設計及び試作を行った。図3に試作した回路の顕微鏡写真を示す。回路の論理状態を読み出すためdc-SQUIDを用いた。dc-SQUIDは最終段のAQFPゲートと磁氣的に結合しており、AQFP回路からの論理出力が“1”のときに有電圧

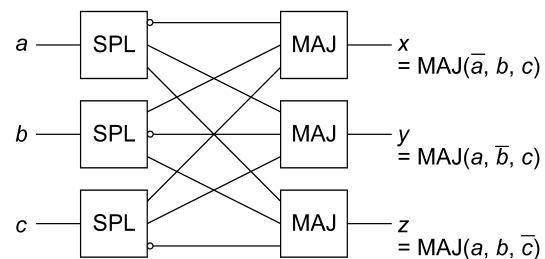


図1 可逆AQFPゲートの回路図

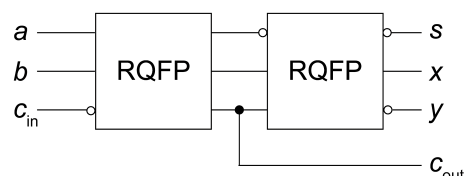


図2 可逆全加算器(RFA)の回路図

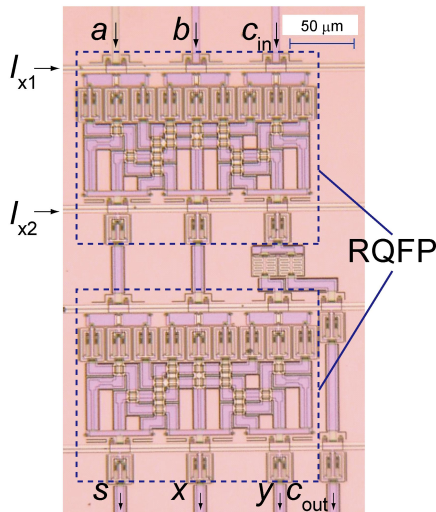


図3 RFAの顕微鏡写真

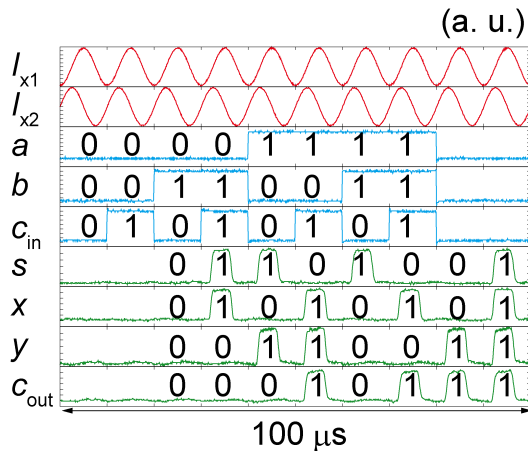


図4 RFAの測定結果

状態に遷移する。図4にRFAの100 kHz動作時の測定結果を示す。 I_{x1} , I_{x2} はsin波のExcitation電流、 s , x , y , c_{out} は出力検出用dc-SQUIDの出力電圧である。測定においてRFAが正常動作したことを確認した。

我々はRFAの1ビット演算あたりの消費エネルギーを数値計算により求め、通常の非可逆な全加算器の消費エネルギーと比較した。図5には、加算の全入力の組み合わせについて平均を取った時の1ビットRFAとAQFP FAの消費エネルギーのクロック周波数依存性を示す。図より、RFAの消費エネルギーは周波数に比例して減少するのに対して、AQFP FAの消費エネルギーは飽和しており、RFAはAQFP FAに対して低周波数において3桁以上の低消費エネルギー性を持つことがわかる。RFAの0.01 GHzにおける消費エネルギー値30yJ (y は 10^{-24})は、Landauer限界の値(560yJ)を大きく下回っている。

一方、逆問題の解法においては、順方向演算の結果生じる不要なゴミ情報の再入力が必要

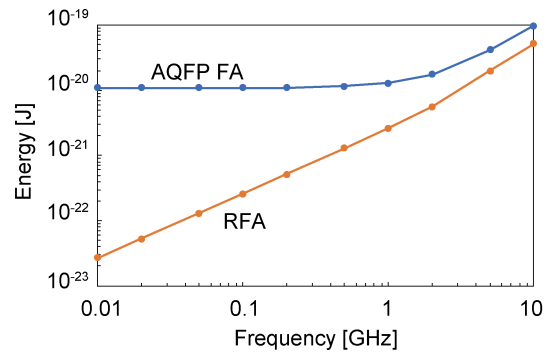


図5 RFAとAQFP FAの演算における消費エネルギーのクロック周波数依存性

要となり、逆行列演算における課題が明らかとなった。しかしながら本研究を通して実際に可逆ゲートを用いた可逆加算器を設計し、減算動作を行うことに成功した。更に可逆多数決ゲートを用いた可逆演算回路の消費エネルギーの評価が可能となり、これらの回路がLandauer限界を超える超低エネルギーで動作することを明らかにした。また、可逆回路の設計において課題であるゴミ情報の生成を効率的に抑える論理合成方法が明らかとなり、可逆演算の研究分野において新たな方向性を示すことができた。

<引用文献>

- [1] R. Landauer, *IBM J. Res. Develop.*, **5**, 183 (1961).
- [2] A. Béruit *et al.*, *Nature* **483**, 187 (2012).
- [3] N. Takeuchi *et al.*, *Scientific Reports*, **4**, 6354 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

- (1) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Reversibility and energy dissipation in adiabatic superconductor logic,” *Scientific Reports*, 査読有, **7**, 2017, 75-1-12. DOI:10.1038/s41598-017-00089-9
- (2) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Minimum energy dissipation required for a logically irreversible operation,” *Physical Review E*, 査読有, **97**, 2018, 1-5. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012124
- (3) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Recent Progress on Reversible Quantum-Flux-Parametron for Superconductor Reversible Computing,” *IEICE Trans. Electron.*, 査読有, 101-C, 2018, 352-358. DOI: 10.1587/transele.E101.C.352

〔学会発表〕(計 17件)

- (1) N. Yoshikawa, “Low-energy High-performance Computing based on Superconducting Technology,” 2016 Appl. Superconductivity Conference (ASC 2016),

- Denver, Colorado, USA, September 7, 2016, 3PL-01. 招待講演
- (2) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Reversibility and energy dissipation in adiabatic quantum-flux-parametron logic," 2016 Appl. Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, Colorado, USA, September 8, 2016, 4EPo2A-02.
- (3) K. Fang, T. Ando, N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Study of multi-excitation AQFP circuits for high-speed and low-latency operations," 2016 Appl. Superconductivity Conference (ASC 2016), Denver, Colorado, USA, September 8, 2016, 4EPo2A-03.
- (4) N. Yoshikawa, N. Tsuji, F. China, T. Matsushima, S. Kobako, Q. Xu, C. Ayala, N. Takeuchi, Y. Yamanashi, T. Ortlepp, "Readout and Signal Processing using Superconducting Circuits for Low-Temperature Detectors," Workshop on Detector Technologies for High Energy Physics, November 27-29, 2016, CiS Research Institute, Erfurt, Germany 招待講演
- (5) 吉川信行, "断熱動作に基づく超低消費電力超伝導デジタル回路技術", 超伝導エレクトロニクス第146委員会 第95回研究会、学士会館本館、2016年4月21日。招待講演
- (6) 吉川信行, "断熱動作に基づく超低消費電力超伝導デジタル集積回路技術", 金属・セラミックス超伝導機器合同研究会、電気学会、大阪大学、2016年6月28日。
- (7) 吉川信行, "超低消費電力断熱動作超伝導集積回路", 電子情報通信学会、SCE2016-55、みやじま杜の宿(広島)、2017年1月31日。招待講演
- (8) N. Yoshikawa, "(Invited) Recent research developments of adiabatic quantum-flux-parametron circuits technology toward energy-efficient high-performance computing," 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2017), Geneva, Switzerland, Sep. 17-21, 2017. 4E01-01.
- (9) N. Takeuchi, C. Ayala, Q. Xu, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "(Invited) Current Progress in Adiabatic Quantum Flux Parametron," The 30th International Symposium on Superconductivity (ISS2017), Tokyo, Japan, Dec. 14-15, 2017. ED5-1-INV.
- (10) N. Takeuchi, C. Ayala, Q. Xu, H. Suzuki, Y. Yamanashi, T. Ortlepp, N. Yoshikawa, "Recent Development and Applications of Adiabatic Quantum Flux Parametron Logic," The 11th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2018) / 6th CRAVITY Symposium, Tsukuba, Japan, Feb. 7-8, 2018.
- O-6.
- (11) T. Yamae, N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Design and Simulation of Reversible Adders Using Adiabatic Quantum Flux Parametron Logic," The 11th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2018) / 6th CRAVITY Symposium, Tsukuba, Japan, Feb. 7-8, 2018. P-9.
- (12) 吉川信行, "【招待講演】超伝導回路を用いた可逆演算", 超伝導エレクトロニクス第146委員会 通信・情報処理分科会 第14回研究会、学士会館、2017年8月3日。
- (13) 山栄大樹、竹内尚輝、山梨裕希、吉川信行, "断熱型量子磁束パラメトロン回路を用いた可逆加算器の設計およびエネルギー評価", 金属・セラミックス超伝導機器合同研究会、MC-17-035、ASC-17-052、産業技術総合研究所、2017年12月11日。
- (14) 荒井孝太、竹内尚輝、山梨裕希、吉川信行, "AQFP回路の微細化に向けたrf-SQUID結合素子の検討", 2017年度秋季(第95回)低温工学・超伝導学会、2D-p02、高知市文化プラザかるぼーと(高知)、2017年11月22日。
- (15) 吉川信行, "高エネルギー効率可逆量子演算回路", 平成30年電気学会全国大会、S4-5、九州大学伊都キャンパス(福岡)、2018年3月15日。
- (16) 山栄大樹、竹内尚輝、山梨裕希、吉川信行, "AQFP回路を用いた可逆加算器の提案", 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会、18p-B303-4、早稲田大学西早稲田キャンパス(東京)、2018年3月18日。
- (17) 荒井孝太、竹内尚輝、山梨裕希、吉川信行, "論理反転型量子磁束パラメトロン回路の提案", 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会、18p-B303-6、早稲田大学西早稲田キャンパス(東京)、2018年3月18日。

〔その他〕

ホームページ等

http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/yoshilab_hp/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 信行 (Nobuyuki Yoshikawa)
 横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：70202398