

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820137

研究課題名(和文) 超高感度と超高速応答を両立する超伝導多チャンネル磁気センシングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of Ultra-High Sensitive and High-Speed Response Superconducting Digital Magnetometer

研究代表者

山梨 裕希 (Yamanashi, Yuki)

横浜国立大学・工学(系)研究科(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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：入力磁場を高感度にデジタル信号として測定可能な超伝導磁気センシングシステムを開発した。磁気センシング部の動作点固定を、超伝導回路で行うことにより、デジタル読み出しと高速応答を両立することができる。高い感度と高速応答が両立できることを、理論解析と基本的な実験結果より示した。地磁気環境下での超伝導磁気センシングシステムの動作を目指し、磁気シールド構造を有する超伝導回路の検討を行った。地磁気環境下で100GHzを超える周波数でTフリップフロップ回路が広い動作余裕度を持って動作することを実証した。これらの技術を組み合わせ、実用的な超伝導デジタル磁気センシングシステムが構築できる。

研究成果の概要(英文)：We developed an ultra-high sensitive and ultra-high response superconducting digital magnetometer. By on-chip superconducting digital control circuits, the operating point of the superconducting magnetic sensor can be kept to be at the optimum point. Theoretical analysis and fundamental experimental results indicate that high magnetic flux resolution and high-speed response to the input magnetic flux can be achieved by the developed superconducting digital magnetometer. Toward the practical magnetometer system, we investigated magnetic-field-tolerant superconducting circuits that can operate under the earth magnetic field environment. We demonstrated 100 GHz operation of the superconducting T flip-flop with the wide operating margin in the earth magnetic field environment. The practical applications of the superconducting digital magnetometer can be achieved by combining two technologies investigated in this research.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：磁気センサ ジョセフソン接合 SQUID デジタルSQUID SFQ回路

1. 研究開始当初の背景

微小磁場計測は、生体磁気計測、非破壊検査、地質調査、宇宙物理など、幅広い用途に用いられる。特に近年、生体磁気計測や天文の分野において、高性能な多チャンネル磁気センシングシステムに対する需要が増している。

超伝導素子を用いた SQUID (Superconductive QUantum Interference Device) 磁気センサは、非常に高感度な磁気センサとして知られている。SQUID は入力磁場に対して出力 (平均) 電圧が磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) の周期で変化する特性を持ち、電圧の変化によって磁場を測定することができる。通常の SQUID 磁気センサは、磁気応答の線形性を保つために動作点を固定する必要がある。このために SQUID の電圧の変化を室温機器で測定し、電圧が元の値に戻るように、キャンセル磁場を SQUID センサに印加する (磁束ロック)。SQUID 磁気センサは 10^{-20} Wb ($10^{-5} \Phi_0$) オーダーの非常に小さな磁束を測定できる一方、この磁束ロック機構のために、センサの応答速度は室温機器の帯域に制限され、低温と室温間の配線の増加のためにセンサの多チャンネル化が困難であるという欠点があった。

これらの欠点を克服するために、磁束ロックを用いずに低温環境下に置かれた超伝導デジタル回路で SQUID 磁気センサの読み出しを行う、デジタル SQUID センサがこれまでに提案されている。これは超伝導体中の磁束の最小単位である磁束量子 (Φ_0) を情報担体として用いる超伝導単一磁束量子回路を制御、読み出し回路として用いるものである。デジタル SQUID センサは高い応答速度と広いダイナミックレンジ、多チャンネル化の容易さを持つものの、動作に磁束量子の有無でビット表現をする回路を用いているために、磁気センサとして最も重要な磁束分解能が Φ_0 に制限されてしまっていた [1, 2]。我々もデジタル SQUID の高感度化の研究を行ったが、磁束分解能を $0.1\Phi_0$ 以下まで高めることができなかった。

2. 研究の目的

従来のデジタル SQUID とは異なる、超伝導体中の電圧パルス密度で情報を表すストカスティック論理に基づく超伝導回路を SQUID 磁気センサの制御、読み出し回路として用いることによる低温下での磁束ロック方法、読み出し方法を新たに提案し、磁束分解能 $10^{-4} \Phi_0$ の非常に高い磁束分解能、高い磁束応答速度と広いダイナミックレンジを実現する。ストカスティック論理に基づく超伝導回路を用いた磁束ロック機構を実現する。解析的に磁束分解能と磁束応答速度を評価しその高い性能を実証する。回路パラメータと磁束分解能および磁束応答速度の関係を明らかにし、各種磁場計測に必要とされる性能を満たすように回路を設計できることを

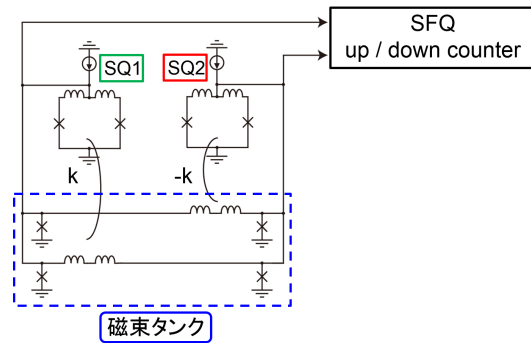


図1 超伝導デジタル磁気センシングシステムの等価回路図

示す。同時に、本センシングシステムを実用的なものにするため、磁場環境下で正常に動作する超伝導回路を実現する。

3. 研究の方法

解析に用いた超伝導デジタル磁気センシングシステムの等価回路を図1に示す。

本磁気センシングシステムでは図1に示すように SQUID を2つ用いる。各 SQUID に逆向きに測定したい磁束を入力する。各 SQUID からは入力磁束に応じた平均電圧が出力されるが、実際には磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) に相当する電圧パルスが、数十 GHz というオーダーの周波数で周期的に出力される。このとき、(出力平均電圧) = (磁束量子) × (周波数) という関係がある。超高速動作が可能な超伝導ストカスティック回路を用いると、高速に出力される電圧パルスひとつひとつを数えることができる。

2つの SQUID から出力される電圧パルス (磁束量子) は磁束タンク回路に入力される。測定する磁束は片方の SQUID だけに入力される。入力 (測定) 磁束が増減すると、片方の SQUID から出力される電圧パルスの周波数が増減する。それにより、2つの SQUID から出力される電圧パルスの周波数に差が生じ、磁束タンクには磁束量子が蓄えられる。磁束タンクに蓄えられた磁束量子はもとの SQUID にキャンセル磁場を印加し、2つの SQUID から出力される電圧パルス周波数が等しくなるまで磁束の帰還がかかる。つまり、2つの SQUID の出力電圧の差を周波数差として検出し、磁束ロックを実現することができる。入力磁束は2つの SQUID からの出力電圧パルス数を、アップダウンカウンタを用いて測定できる。図1の回路において、回路動作を理論的に解析し、超伝導デジタル磁気センシングシステムの磁場感度、応答速度、ダイナミックレンジを導出する。

外部磁場に耐性を持つ回路の研究においては、回路部の上下を、超伝導グランド層で覆った構造を検討する。超伝導体の完全反磁性を利用して、外部磁場をキャンセルすることができる。この回路構造を用いた回路設計

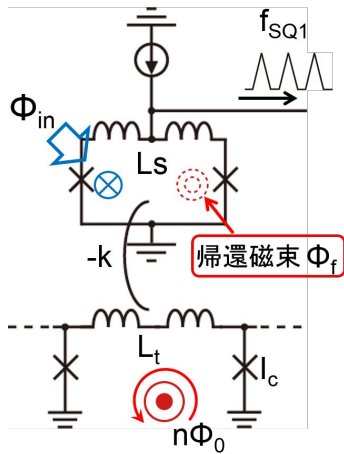


図2 SQUIDと磁束タンク部の拡大と、その回路パラメータ

の手法を確立し、地磁気環境下での超伝導回路の高速動作を実証する。

4. 研究成果

提案磁気センシングシステムの性能を理論的に解析した。図2に解析を行った磁気センサの等価回路図とその回路パラメータを示す。

超伝導デジタル磁気センシングシステムの性能の解析結果から得られた重要な知見は以下のとおりである。

- 超伝導デジタル磁気センシングシステムの磁束分解能は、磁束タンク回路とSQUIDの間の磁気結合係数 k に比例し、磁束タンク回路のインダクタンス L_t の0.5乗に反比例する。

- 超伝導デジタル磁気センシングシステムの応答速度は磁束分解能とトレードオフの関係にある。

- 超伝導デジタル磁気センシングシステムの測定可能磁束範囲(ダイナミックレンジ)は k に比例し、 L_t の0.5乗に比例する。

これらの解析結果から、必要とされる磁場

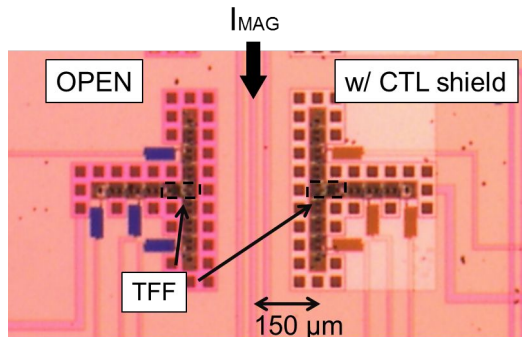


図3 磁気シールド構造を有するTフリップフロップ回路のテスト回路(w/ CTL shield)。OPENは磁気シールド構造を持たない回路で、比較のために設計した。

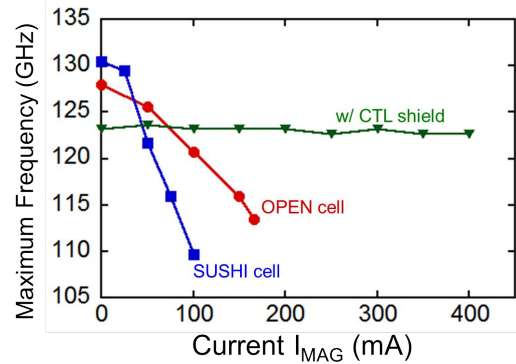


図4 磁気シールド構造を持つTフリップフロップと、磁気シールド構造を持たないTフリップフロップ(OPEN, SUSHI)の最高動作周波数の外部磁場依存性。

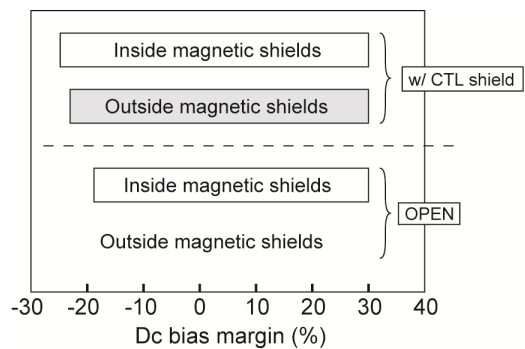


図5 Tフリップフロップの外部磁気シールド内と外部磁気シールド外(地磁気環境下)における動作余裕度の比較。磁気シールド構造を有する回路は100GHzを超える動作速度で、地磁気環境下で正しく動作した。

感度や測定した磁場の帯域などから、所望の超伝導デジタル磁気センシングシステムを設計できる。回路シミュレーションと基本的な実験結果により、これまでのデジタルSQUIDでは不可能であった、 Φ_0 の1/100以下の磁束分解能を持つデジタル磁気センシングシステムが実現できることを示した。

外部磁場に耐性を持つ回路の研究において、上部および下部グラウンドプレーンを用いて磁気シールドを施した回路を実現した。磁気シールドを施した状態でも、回路のレイアウトから正しくインダクタンスの値を抽出できることを実験的に確認し、回路設計に用いた。図3に磁気シールド構造を有するTフリップフロップ回路のテスト回路を示す。回路は産業総合研究所の超伝導集積回路作成プロセスを用いて試作した。

設計した回路は、信号伝搬回路、周波数測定回路、Tフリップフロップである。Tフリップフロップの最高動作周波数を、外部磁場を変えながら測定した。Tフリップフロップ

の最高動作周波数は、平均電圧法[4]を用いて測定した。図4に磁気シールド構造を用いたTフリップフロップと、用いないTフリップフロップの最高動作周波数の外部磁場依存性を示す。磁気シールド構造を持つ回路は外部磁場を大きくしても、最高動作周波数がほとんど変化しないことがわかる。超伝導回路の測定時に通常用いる外部磁気シールドの外、つまり地磁気環境下で磁気シールド構造を持つTフリップフロップを測定したところ、100 GHzを超える動作速度において、十分広い動作余裕度を持って正常に動作することがわかった。

本研究では、高い磁束分解能を持つ超伝導デジタル磁気センシングシステムの設計と、外部磁場に耐性を持つ超伝導回路の実現を行った。これらの要素技術を組み合わせて、地磁気環境下で動作が可能な、実用的な超伝導デジタル磁気センシングシステムが実現できる。

<引用文献>

- [1] T. Reich et al., "Experimental study of a hybrid single flux quantum digital superconducting quantum interference device magnetometer," *J. Appl. Phys.*, vol. 104, p. 024509, 2008.
- [2] I. Haverkamp et al., "Linearity of a Digital SQUID Magnetometer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, pp. 705-708, 2011.
- [3] M. Hidaka, S. Nagasawa, T. Satoh, K. Hinode, and Y. Kitagawa, "Current status and future prospect of the Nb-based fabrication process for single flux quantum circuits," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. S138-S142, Feb. 2006.
- [4] S. Iwasaki, M. Tanaka, N. Irie, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, H. Terai, and S. Yorozu, "Quantitative evaluation of delay time in the single-flux-quantum circuits," *Physica C*, vol. 463-465, pp. 1068-1071, May 2007.

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 5 件)

- [1] K. Sato, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "High Speed Operation of Single Flux Quantum Multiple Input Merger Using a Magnetically Coupled SQUID Stack," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, p. 1301605, Jun. 2015.
- [2] S. Nishimoto, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Design Method of Single Flux Quantum Logic Circuits Using Dynamically Reconfigurable Logic Gates," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, p. 1301405, Jun. 2015.
- [3] Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, "Design and Evaluation of Magnetic Field Tolerant Single

Flux Quantum Circuits for Superconductive Sensing Systems," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E97-C, no. 3, pp. 178-181, Mar. 2014.

[4] K. Aoki, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Multiplexing Techniques of Single Flux Quantum Circuit Based Readout Circuit for a Multi-Channel Sensing System," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, p. 2500204, Jun. 2013.

[5] Y. Tsuga, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Asynchronous Digital SQUID Magnetometer with an On-Chip Magnetic Feedback for Improvement of Magnetic Resolution," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, p. 1601405, Jun. 2013.

[学会発表](計 10 件)

[2] F. China, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Performance Estimation and Design of High-Sensitive Superconductive Digital Magnetometer," 27th International Symposium on Superconductivity (ISS2014), Tokyo, Japan, Nov. 2014.

[5] F. China, "High sensitivity superconducting digital magnetometer," Stellenbosch Workshop on Superconductive Circuit Modelling and Layout Extraction, Stellenbosch, South Africa, Sep. 2014.

[6] Y. Yamanashi, "Design and high-speed test of magnetic-field-tolerant single-flux-quantum circuits," Stellenbosch Workshop on Superconductive Circuit Modelling and Layout Extraction, Stellenbosch, South Africa, Sep. 2014.

[4] K. Sato, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "High Speed Operation of Single Flux Quantum Multiple Input Merger Using a Magnetically Coupled SQUID Stack," Applied Superconductivity Conference (ASC) 2014, Charlotte, US, Aug. 2014.

[5] K. Sato, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Design and Implementation of a High Sensitive DC/SFQ Converter" Superconductive Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2013, Tsukuba, Japan, Nov. 2013.

[6] F. China, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Improvement of Slew Rate of High-Sensitive Superconductive Digital Magnetometer" Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV) 2013, Tsukuba, Japan, Nov. 2013.

[7] Y. Yamanashi, "Recent Research Activities in YNU," 8th FLUXONICS RSFQ Design Workshop 2013, Ilmenau, Germany, Sep. 2013.

[8] Y. Yamanashi, Y. Tsuga, and N. Yoshikawa, "Magnetic field tolerant single-flux-quantum circuit for superconducting sensing system," International Superconductive Electronics

Conference (ISEC) 2013, Cambridge, USA, Jul. 2013.

[9] K. Sato, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Novel multiple input single flux quantum merge circuit using serially connected dc-SQUIDs," International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2013, Cambridge, USA, Jul. 2013.

[10] F. China, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "New superconductive digital magnetometer with sub-flux quantum resolution," International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2013, Cambridge, USA, Jul. 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

山梨 裕希 (Yamanashi Yuki)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70467059