

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820130

研究課題名(和文) 単一磁束量子回路の性能向上に資する電流比較器の詳細な解析及び設計手法の確立

研究課題名(英文) Analysis and establishment of design of a comparator for currents for performance improvement of the single flux quantum circuits

研究代表者

宮嶋 茂之 (MIYAJIMA, Shigeyuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員研究員

研究者番号：50708055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：単一磁束量子(SFQ)回路で用いられる電流比較器の動作解析を行った。電流比較器にはQuasi-One-junction SQUID (QOS)を用いて、雑音を含んだ数値計算による解析を行った。数値計算の結果からQOS比較器内のインダクタンスの値がQOS比較器の動作点、動作モードに大きく影響を与えていることを明らかにした。また、実際にAIST-STP2によるNb多層プロセスを用いてQOS比較器の作製を行った。更にチップ内に超伝導シールドを用いた雑音耐性の強いQOS比較器の作製も行った。これらの結果はSFQ回路の実用化に向けて大きく前進したことを示している。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the operation of a comparator for currents used in the single flux quantum (SFQ) circuits. A quasi-one-junction SQUID (QOS) comparator was used for a comparator in this work and analyzed by a numerical analysis including noise parameters. We found that the operating points and operating modes of the QOS comparator are affected strongly by the inductances in the QOS from the results of numerical analysis. We also fabricated the QOS comparators using AIST standard process 2 (STP2). Furthermore, the QOS comparators with the superconducting shields in the chip are fabricated. We consider that these results can contribute to the practical system using the SFQ circuits in the near future.

研究分野：電子工学

キーワード：超伝導デバイス 電流比較器 ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

ジョセフソン接合(JJ)をスイッチングデバイスとして用いる単一磁束量子(SFQ)回路は、超伝導状態において量子化された磁束を情報担体とする超伝導デジタル集積回路である。超伝導体として Nb を用いるジョセフソン接合のスイッチング時間が数 ps であり、SFQ 回路は数十 GHz の高速動作性と低消費電力性を持つ。SFQ 回路を用いた超高速マイクロプロセッサ、広帯域、高感度なアナログ/デジタル(A/D)変換器等が既に実証されており、現在では実用化に向けた研究が進められている。

これらのシステムの中で最も重要な回路の一つとして電流比較器が挙げられる。電流比較器は 2 個の JJ により構成される。この比較器には SFQ の伝搬方向の制御する機能があり、JJ に並列に接続されたシャント抵抗で発生する熱雑音で決まる高い電流感度を持つという特徴がある。これらの特徴から SFQ 回路内では、論理回路の構成、また 4 K という動作温度での熱雑音により高い電流感度が実現されるため、検出器等の出力信号の感知等に用いることが出来る。しかしながら、単純な回路構成ではあるがその動作は非常に複雑であり、実際には熱雑音以外の何らかの要因による電流感度の悪化、チップ間での電流感度、動作マージンの大きなばらつきがあり、SFQ 回路の実用化の大きな障害となっている。

これまでも SFQ 電流比較器に関して数多くの研究者により、様々な手法でその動作の解明に関する研究が進められている。その中でも申請者はこれまでに電流比較器の数値計算及び実験により、超伝導イメージングシステムに適用出来る電流比較器の動作実証に成功した(S. Miyajima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **52**, 033101 (2013))。また、海外の研究者とも共同で、電流比較器の電流感度の向上及び動作の解明を進めてきた(T. Ortlepp *et al.*, J. Appl. Phys., **111**, 123901 (2012))。しかしながら、それでも尚、電流比較器の動的な物理の詳細には不明な点が多く、その設計手法を確立するまでに至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、数値計算による SFQ 電流比較器の動作の詳細な評価、更に熱雑音を考慮した SFQ 電流比較器の特性の評価を行う。更に回路パラメータの浮遊成分を解析するために 3 次元電磁界数値解析及び試作された回路の評価を行い、SFQ 電流比較器の回路パラメータの再抽出を行う。そして SFQ 電流比較器の持つ非常に複雑な動作を明らかにする。また、微小な電流検出のための高感度電流比較器、論理回路の構成のための広い動作マージンを持つ電流比較器等、様々な用途に対応するべく等価回路からレイアウトレベルまでの設計手法の確立を行い、今後の SFQ 回路の実用化の支援を行う。

3. 研究の方法

本研究では、まず電流比較器の諸特性を数値計算を用いて評価する。その後、SFQ 電流比較器のレイアウトを行い、回路パラメータの浮遊成分を抽出し、数値計算を行うことで回路パラメータの浮遊成分による SFQ 電流比較器の特性を評価する。更に SFQ 電流比較器を用いた回路の試作、実験を行い統計的なデータを集める。これまでに SFQ 回路の設計及び数値計算の大阪府立大学での環境の整備を完了している。研究背景で述べた様に、本研究では SFQ 電流比較器の統計的なデータを集積した後、SFQ 回路の実用化に向け、目的に合わせた SFQ 電流比較器の設計手法の確立を行う。

4. 研究成果

本研究では SFQ 電流比較器として QOS(Quasi-One-junction SQUID)比較器を用いた。図 1 に QOS 比較器の等価回路図を示す。QOS は L_Q - J_Q - J_G - L_G のループで構成される。図 1 中の I_{bQOS} が動作点を調節するバイアス電流である。 I_{ctrl} は QOS へ入力される電流であり、検出器等と接続する際はこの I_{ctrl} が検出器の信号に対応する。 I_{ctrl} の値がある値(閾値)より大きい場合は J_G , J_Q の 2 つの接合がスイッチし、SFQ OUTPUT へと SFQ パルスが伝搬される。 I_{ctrl} の値が閾値より小さい場合は J_E がスイッチして、SFQ OUTPUT からは何も出力されない。QOS 比較器の動作の解析としては比較器の電流閾値の遷移を指標とした。比較器の電流感度は理想的にはある閾値で決まるはずだが、主に熱雑音により閾値が幅を持つようになる。また、電流閾値は回路パラメータに伴うバイアス電流の流れ方で遷移する為、電流閾値の遷移を見ることで回路の挙動が分かる。

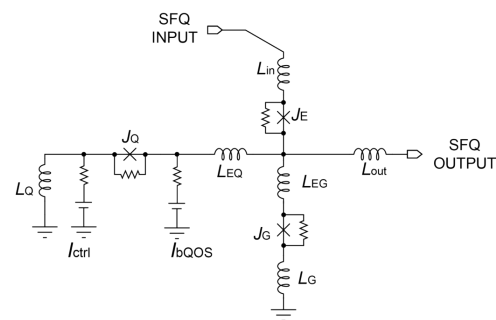


図 1 QOS 比較器の等価回路図。“x”印はジョセフソン接合を示している。

まず数値計算を用いて QOS 比較器の動作解析を行った。数値計算では雑音を含んだシミュレータ(JSIM_N)を用いた。雑音源は JJ と並列に接続されているシャント抵抗で発生する熱雑音を想定している。

入力には SFQ パルスを一定回数入力し、出力された SFQ パルスをカウントし、その比を

取ること、 I_{ctrl} に対する出力確率の関係を評価した。このとき、 $I_{bQOS} = 80 \mu A$ で固定で I_{ctrl} を変化させた。図 2 に数値計算の結果の一部を示す。

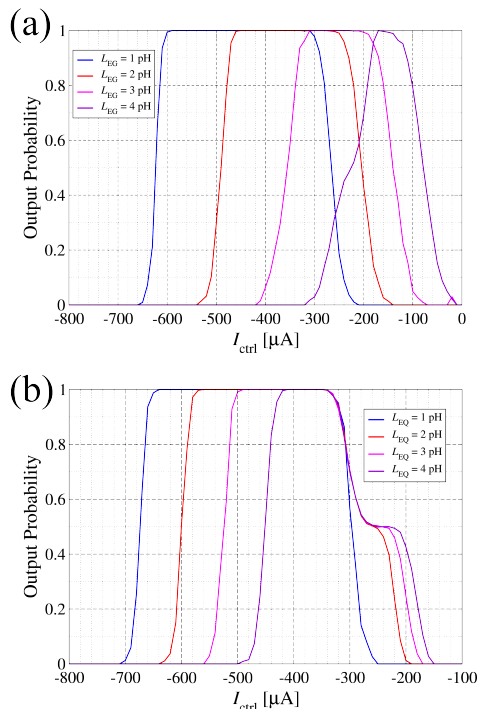


図 2 雑音を含んだ数値計算によって得られた遷移曲線の回路パラメータ依存。

図 2(a)は L_{EG} を変えたときの遷移曲線、図 2(b)は L_{EQ} を変えたときの遷移曲線であり、動作点がシフトしていることが確認できる。これは I_{bQOS} が $80 \mu A$ で固定してあるのに対して、インダクタンスが変わったため遷移したと考えられる。また、 L_{EG} を変えたときは立上り、 L_{EQ} を変えたときは立下りで遷移の仕方が明らかに変わっている。これは J_G 、 J_Q のどちらが先にスイッチするかという動作モードの違いから表れており、立ち上がり時は J_G 、 J_Q の順に、立下り時は J_Q 、 J_G の順にスイッチすることで SFQ OUTPUT へと SFQ パルスが伝搬される。このことから先にスイッチする接合付近のインダクタンスが大きいと出力確率が 0 から 1 へと遷移している段階で、QOS ループ内に磁束量子(Φ_0)を保持してしまい、動作に影響を与えているということが分かった。

この他にも L_{EQ} 、 L_Q 及び L_G 、 L_{EG} のそれぞれの合成インダクタンスを同じ値にした場合にも動作の挙動が異なることが分かった。合成インダクタンスが同じであれば、与えている直流バイアス電流が同じになるはずであるが、異なる挙動を示すということは JJ のスイッチの際の動特性による影響を受けていることが考えられる。

次に数値計算との比較を行うために実際に

回路の作製を行った。回路作製には産業技術総合研究所の Nb 標準 2 プロセスを用いた。作製された QOS 比較器の顕微鏡写真を図 3 に示す。

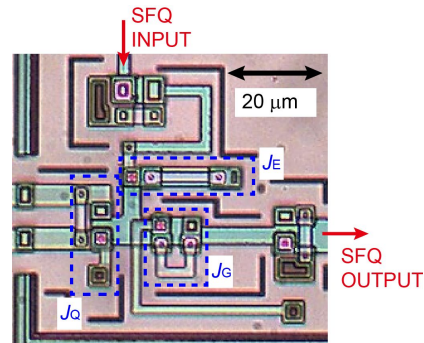


図 3 作製された QOS 比較器の顕微鏡写真。

QOS 比較器自身の大きさは $40 \mu m \times 40 \mu m$ である。この QOS 比較器はインダクタンスの異なるものを数種類作製した。この QOS 比較器を評価する為に 4 K Gifford-McMahon (GM) 冷凍機に実装したが、回路の正常動作が得られなかった。この原因としては雑音を除去しきれなかったことがあげられる。GM 冷凍機では冷却する為のコンプレッサ、排気用のポンプが接続されており、これらの装置からの雑音や、電源からの雑音がある。また GM 冷凍機ではコールドヘッドの振動が低温ステージに伝わっており、この振動への対策が不十分であったことが考えられる。これらの原因から主な雑音源の特定が出来ずに作製された回路を評価するまでに至らなかった。

そこで雑音耐性に強い SFQ 回路として、チップ内で回路を超伝導シールドで覆う回路の設計、作製を行った。この手法は実際に他の研究機関で用いられ、動作実証の実績がある。これらの回路は作製した段階であり、まだ評価できていないが、数値計算結果と実験結果の比較への見通しを立てることが出来た。

また電流比較器以外にも実際に応用される検出器システムの開発として、超伝導ナノワイヤによる中性子検出器、SFQ デジタル信号処理回路、SQUID を用いた走査型磁場顕微鏡の開発も並行して行った。中性子検出器に関しては、実際に中性子照射を行い、中性子を検出することに成功した。SQUID 顕微鏡に関しても高い空間分解能と磁場感度で磁場ベクトルを検出できる SQUID センサの開発に成功した。

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 13 件)

S. Miyajima, Y. Narukami, H. Shishido, N. Yoshioka, A. Fujimaki, M. Hidaka, K. Oikawa, M. Harada, T. Oku, M. Arai, T. Ishida, Time-Dependent Flux from Pulsed Neutrons Revealed by Superconducting Nb Current-Biased Kinetic Inductance Detector with ^{10}B Converter Operated at 4 K, JPS Conf. Proc., 査読有, Vol. 8, 2015, 51004

DOI: 10.7566/JSPCP.8.051004

S. Miyajima, Y. Narukami, Y. Yamaguchi, H. Nakayama, H. Shishido, T. Ishida, A. Fujimaki, M. Hidaka, Coincidence Detection of Double-Layered Current-Biased Kinetic Inductance Detectors using a 20 ps Pulsed Laser, IEEE Xplore Superconducting Electronics Conference, 査読有, Vol. 1, 2015, pp1-3

DOI: 10.1109/ISEC.2015.7383435

S. Miyajima, T. Okamoto, H. Matsumoto, H. T. Huy, M. Hayashi, M. Maezawa, M. Hidaka, T. Ishida, Vector Pickup System Customized for Scanning SQUID Microscopy, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol 25, 2015, 1600704

DOI: 10.1109/TASC.2014.2361786

S. Miyajima, K. Ito, Y. Kita, T. Ishida, Current Sensitivity Enhancement of a Quasi-One-junction SQUID Comparator as an Input Circuit of SFQ Readout Circuit for a Superconducting Detector, J. Low Temp. Phys., 査読有, Vol. 176, 2015, pp.465-469

DOI: 10.1007/s10909-014-1119-3

[学会発表](計 47 件)

宮嶋茂之、山下太郎、三木茂人、寺井弘高、動作点調節機能を有する SFQ 入力インターフェース回路の評価、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 20 日、東京工業大学 大岡山キャンパス

S. Miyajima, H. Yamaguchi, H. Nakayama, H. Shishido, A. Fujimaki, M. Hidaka, M. Harada, K. Oikawa, T. Oku, M. Arai, T. Ishida, Development of a neutron imager based on superconducting detectors and SFQ readout circuits (招待講演), 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), 2015 年 11 月 17 日, TOWER HALL FUNABORI, Tokyo

S. Miyajima, H. Nakayama, T. Ishida, Numerical analysis on the influence of the circuit parameters on the operation of a quasi-one-junction SQUID comparator, 12th European Conference on Applied

Superconductivity, 2015 年 9 月 8 日, Lyon Convention Center, Lyon, France

宮嶋茂之、鳴神吉人、山口裕之、中山弘貴、穴戸寛明、藤巻朗、日高睦夫、小嶋健児、石田武和、Kalliope を用いた電流バイアス運動インダクタンス検出器 (CB-KID) の信号読み出し、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学 早稲田キャンパス

宮嶋茂之、鳴神吉人、穴戸寛明、吉岡直人、藤巻朗、日高睦夫、及川健一、原田正英、奥隆之、新井正敏、石田武和、電流バイアス運動インダクタンス検出器による中性子検出、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 18 日、北海道大学 札幌キャンパス

宮嶋茂之、岡本拓人、松本仁志、ヒュイホタン、林正彦、前澤正明、日高睦夫、石田武和、高感度化に向けた SQUID センサによる走査型 SQUID 顕微鏡の改良、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日、北海道大学 札幌キャンパス

S. Miyajima, Y. Narukami, H. Shishido, A. Fujimaki, M. Hidaka, K. Oikawa, M. Hidaka, T. Oku, M. Arai, T. Ishida, Novel current-biased kinetic inductance detector aiming at neutron radiography (招待講演), The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (THz-PLASMA 2014), 2014 年 12 月 1 日, Kyoto University, Kyoto

S. Miyajima, T. Okamoto, H. Matsumoto, H. T. Huy, M. Hayashi, M. Maezawa, M. Hidaka, T. Ishida, Vector Pick-up System Customized for Scanning SQUID Microscopy, Applied Superconductivity Conference (ASC2014), 2014 年 8 月 12 日, Charlotte, U.S.A

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮嶋茂之 (MIYAJIMA, Shigeyuki)
大阪府立大学・工学研究科・客員研究員
研究者番号：50708055

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：