

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13999

研究課題名(和文) 超高感度電荷センサである単一電子素子を用いた磁束量子検出法の4.2K動作実証

研究課題名(英文) Detection of a single-flux-quantum at 4.2 K by means of a ultra-charge-sensitive single-electron device

研究代表者

水柿 義直 (MIZUGAKI, Yoshinao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30280887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導リング内の磁束量子の検出には、高感度磁気センサである超伝導量子干渉素子が用いられるが、予めこれを集積チップ上に作りこむ必要があり、またその専有面積が大きいという問題があった。本研究では、超小型かつ超高感度電荷センサである単一電子素子を用いた磁束量子検出を試みた。超伝導チップ上に単一磁束量子論理回路を作製し、その上に単一電子素子を作製した。単一磁束量子論理回路の超伝導体にはニオブを、単一電子素子の微小島電極には金ナノ粒子を用いた。これらの個別要素については、外部発表に結びつく結果が得られた。超伝導チップ上に作製した単一電子素子の感度が不十分だったため、単一磁束量子検出には至らなかった。

研究成果の概要(英文)：A superconducting quantum interference device (SQUID) is commonly used for detection of a single-flux-quantum (SFQ) in a superconducting loop. A SQUID, however, occupies a relatively large area. On the other hand, a single-electron (SE) device is a ultra-small and ultra-charge-sensitive sensor, which is expected to detect an SFQ. In this research project, we integrated an SFQ digital circuit with an SE device that would work as an SFQ detector. SFQ digital circuits were made of niobium superconductors, whereas gold nano-particles were employed for island electrodes of SE devices. SFQ circuits and SE devices developed in this research project demonstrated new functionality, resulting in several publications. Unfortunately, the whole circuit including an SFQ digital circuit and an SE device did not work as we expected. The reason was insufficient sensitivity of the SE device on the SFQ circuit.

研究分野：電子工学

キーワード：単一磁束量子 単一電子素子 金ナノ粒子 クーロン閉塞 超伝導 ジョセフソン効果 低温

1. 研究開始当初の背景

超伝導リングにおける磁束の量子化、および超伝導トンネル接合で発現するジョセフソン効果を利用することで、単一磁束量子論理回路と呼ばれる超高速・超低消費電力のデジタル回路が実現できる。これまで、国内外の研究機関において種々の単一磁束量子論理回路の液体ヘリウム温度(4.2 K)動作が実証されている(引用文献)。

申請者は、これまでの自身の単一磁束量子論理回路に関する研究を通して、そのテスト方法の開発が重要であると認識していた。集積回路のテスト方法の開発については、半導体集積回路においても重要課題として古くから研究されているが、単一磁束量子論理回路にはそれ特有の困難さがある。超伝導集積回路内のデジタル情報は単一磁束量子の有無で表現されており、これを外部から確認するには、何らかの方法でリング内の磁束量子(あるいはリング周回電流)を検出する必要がある。すなわち、デジタル状態を確認したい箇所に配線をつなぐだけでは不十分であり、磁束量子を検出するための超高感度磁束センサ・超伝導量子干渉素子(SQUID)をあらかじめ当該箇所に設けておき、そのSQUIDの出力を読むことになる。また、SQUIDによる磁束検出のための磁氣的結合には比較的大きな面積(典型的には10 μm角以上)が必要となる。

一方、単一電子素子は最も高感度な電荷センサであり、種々の量子現象の観測に利用されている(引用文献)。近年、電子スピン偏極の違いをポテンシャル差異として検出する研究が進められており、本研究課題の目標である磁束量子検出も、それら同様の挑戦的研究に位置づけられる。加えて、単一電子素子は超小型(サブミクロンサイズ)であり、完成後の単一磁束量子論理回路への後付けが可能なることから、単一磁束量子論理回路のテスト方法としても有用である。

2. 研究の目的

本研究課題では、磁束量子の有無の読み出しに、従来用いられてきたSQUIDに代えて、単一電子素子を用いることを提案する。単一電子素子は超高感度電荷センサであるとともに超小型であり、完成後の単一磁束量子論理回路に後付けすることが可能である。

具体的には、単一磁束量子論理回路が載る超伝導ニオブ集積チップの上に単一電子素子を作製した。液体ヘリウム温度における実験にて、単一磁束量子論理回路内の磁束量子の有無を単一電子素子により検出することを目指した。

3. 研究の方法

本研究課題では、次の3つのテーマを設けて研究を遂行した。1つ目と2つ目は、それぞれ単一磁束量子回路と単一電子素子それ

ぞれの設計・作製に関するものであり、それらを統合した、本研究課題の主題となるテーマが3つ目である。

(1) 単一磁束量子回路の設計

これまでに研究代表者が培ってきた設計技術を用いて超伝導ニオブ集積チップ上の単一磁束量子回路を設計するとともに、単一電子素子との結合を行う領域の多層構造の設計を行った。超伝導ニオブ集積チップは、産業技術総合研究所のニオブ標準2プロセスを用いて作製することから、そのプロセスルールに則った設計を行った。チップの設計と作製は、研究期間全体で8回行った。なお、後述するように、研究期間の途中にて単一電子素子の作製プロセスを変更したことから、超伝導ニオブ集積チップ側もそれに対応した設計変更を行った。また、チップ余剰面積を利用して、単独の単一磁束量子回路の改良も行った。単独の単一磁束量子回路の特性評価は液体ヘリウム温度で行った。

(2) 単一電子素子の作製

液体ヘリウム温度で動作する単一電子素子の作製プロセスの開発を行った。まずは、研究代表者が長年続けてきた2層レジストと斜め蒸着を利用した微小アルミトンネル接合作製法、および、それに絶縁層挿入工程を加えたSiO₂援用微小アルミトンネル接合作製法を採用した。その後、研究遂行の過程において、これらの方法では液体ヘリウム温度で動作する素子の作製歩留まりが悪いことが明らかとなったため、2年目から金ナノ粒子を用いた作製方法に変更した。これらの単一電子素子の特性評価は、液体ヘリウム温度から室温までの範囲で行った。

(3) 超伝導ニオブ集積チップ上への単一電子素子の作製

研究期間2年目後半にて、上記2つのテーマの成果を融合し、超伝導ニオブ集積チップ上に単一電子素子を作製した。まずは、超伝導ニオブ回路と単一電子素子との間の電氣的接触を得るためのプロセス条件を洗い出した。続いて、超伝導ニオブ集積チップ上に金ナノ粒子を用いたプロセスにより単一電子素子の作製を行った。特性の評価は液体ヘリウム温度で行った。

4. 研究成果

前節での項目分けに沿って、得られた成果について述べる。

(1) 単一磁束量子回路に関する成果

超伝導ニオブ集積チップの作製プロセス、および金ナノ粒子を用いた単一電子素子の作製プロセスの双方を考慮し、超伝導ニオブ集積チップ側の多層構造を設計した。チップ上に約200 μm四方の「単一電子素子作製領域」を確保し、その領域と他超伝導層との絶

縁構造，その領域から外部への電極取り出し構造を設計し，実際に作製した。さらに，この領域に接続する単一磁束量子回路として，直流電流／単一磁束量子変換回路，ジョセフソン伝送線路，および単一磁束量子／直流電圧変圧回路の3要素からなる回路を設計した。あわせて，単一電子素子作製時のEB描画位置合わせ用のマークを複数用意した。

また，チップの余剰面積を利用した単一磁束量子回路の改良については，特に単一磁束量子周波数変調型デジタル-アナログ変換器の要素回路について，新しい機能の実証などを行った。本研究課題の範囲においては，これらの新規開発回路と単一電子素子との接続は未着手となった。

(2) 単一電子素子の作製に関する成果

研究期間の初期においては，SiO₂ 援用 Dolan 法を用いて作製した微小アルミトンネル接合の利用を想定していた。しかしながら，実験結果の解析の結果，液体ヘリウム温度で動作する単一電子素子をこの方法で作製することは，歩留まりの観点から困難であることが判明した。超伝導ニオブ集積チップの数に限りがあることもあり，作製方法を変更することにした。

検討の結果，金ナノ粒子を用いるプロセスを採用することにした。すでに，金ナノ粒子を用いた室温動作単一電子素子が報告されており，液体ヘリウム温度での動作については何ら問題ないと判断した。一方，金ナノ粒子を微小電極ギャップ間にいかに配置するかが課題になると考えられた。また，複雑かつ長期間に渡る単一電子素子作製プロセスは，超伝導回路の特性を悪化させる恐れもあった。そこで，本研究課題では，金ナノ粒子の精密配置を行わず，金コロイドを散布するだけで形成される金ナノ粒子ランダム2次元配列を用いることにした。

条件出しを含めて実験を行い，金ナノ粒子2次元ランダム配列を用いた素子においても，ゲート電圧によって特性が変化する様子が確認された。容量結合型ゲート素子や抵抗結合型ゲート素子，あるいはそれらを融合した特性が得られた。さらに，室温にて負性抵抗が確認されるなど，ランダム配列に起因する数多くの非線形特性が確認された。

(3) 超伝導ニオブ集積チップ上への単一電子素子の作製

前述の2項目の成果を融合し，超伝導ニオブ集積チップ上に金ナノ粒子2次元ランダム配列からなる単一電子素子の作製を行った。その光学顕微鏡写真を図1に示す。単一磁束量子回路を作りこんだ超伝導ニオブ集積チップ上に，単一電子素子を作製する領域を設け，そこに金ナノ粒子2次元ランダム配列を形成した。

素子特性の測定は，液体ヘリウム浴中で行った。単一電子素子の外部回路との電氣的接

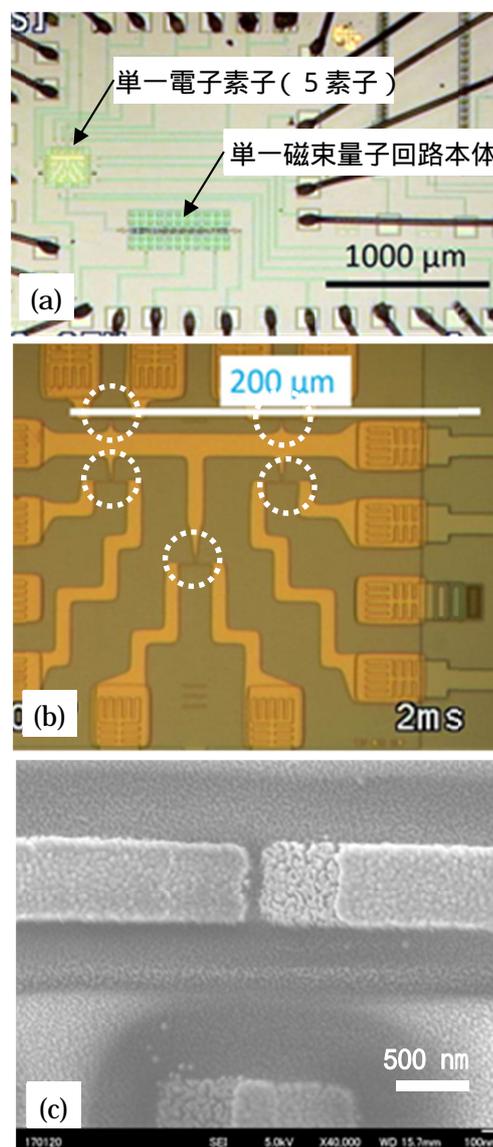


図1：ニオブ集積チップ上の単一磁束量子回路と単一電子素子。(a) 全体図(光学顕微鏡写真)。測定用のボンディングワイヤがつながれている。(b) 単一電子素子作製部分(光学顕微鏡写真)。丸で囲まれた部分(5ヶ所)の金ナノ粒子2次元ランダム配列を単一電子素子として機能させる。(c) 単一電子素子の拡大図(電子顕微鏡写真)。

続では，チップ上のニオブ配線を一度経由し，ニオブ配線上のパッドとチップキャリアとの間をボンディングでつなぐことで実現した。

測定の結果，単一電子素子と外部回路との間の電氣的接続に問題はなかった。一方，単一電子素子の電流-電圧特性にクーロン閉塞に起因する非線形性は確認されたが，ゲート応答が微弱であり，残念ながら当初の目標であった磁束量子検出の実証には至らなかった。今後は，単一電子素子の実効的な感度についても検討が必要であることが明らか

となった。

なお、本研究で開発した、「サブミクロン程度の寸法を有する3電極を用意した後に金コロイド溶液滴下するだけの単一電子素子作製方法」は、他に例を見ないユニークなプロセスである。特に、パーコレーションモデルによって、3電極のうち2電極が接続し、残りの1電極が絶縁される条件を見出し、それを実験で検証したことは、研究計画当初には予見していなかった成果である。

<引用文献>

H. Hayakawa, et al., Proc. IEEE, **92** (2004) 1549.

K. K. Likharev, Proc. IEEE, **87** (1999) 606.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

Tran T. T. Huong, K. Matsumoto, M. Moriya, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki, "Gate-tuned negative differential resistance observed at room temperature in an array of gold nanoparticles," Applied Physics A, 査読有, vol. 123, no. 4, 268-15, 2017.

DOI: 10.1007/s00339-017-0891-8
Y. Mizugaki, T. Watanabe, and H. Shimada, "Single-Flux-Quantum Bipolar Digital-to-Analog Converter Comprising Polarity-Switchable Double-Flux-Quantum Amplifier," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 27, no. 4, 1400104-1-4, 2017.

DOI: 10.1109/TASC.2016.2625739
M. Takiguchi, H. Shimada, and Y. Mizugaki, "Sharp Switching Characteristics of Single Electron Transistor with Discretized Charge Input," Applied Sciences, 査読有, vol. 6, no. 8, 214-1-8, 2016.

DOI: 10.3390/app6080214
M. Moriya, Tran T. T. Huong, K. Matsumoto, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki, "Fabrication of single electron devices using dispersed nanoparticles and fitting experimental results to values calculated based on percolation model," Applied Physics A, 査読有, vol. 122, no. 8, pp. 756-1-7, 2016.

DOI: 10.1007/s00339-016-0285-3
Y. Mizugaki, K. Sawada, T. Watanabe, and H. Shimada, "Experimental demonstration of single-flux-quantum sequential-access mask ROM," IEICE Elec-

tronics Express, 査読有, vol. 13, no. 12, pp.20160342-1-6, 2016.

DOI: 10.1587/elex.13.20160342

Y. Mizugaki and T. Watanabe, "Design and Operation of a Double-Flux-Quantum Amplifier Excluding Flux Bias Lines," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, vol. 26, no. 5, 1301104-1-4, 2016.

DOI: 10.1109/TASC.2016.2565602

Y. Mizugaki, T. Watanabe, and H. Shimada, "Superconducting bipolar digital-to-analog converter equipped with dual double-flux-quantum amplifier," IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 13, no. 10, pp.20160242-1-6, 2016.

DOI: 10.1587/elex.13.20160242

Tran T. T. Huong, H. Shimada, and Y. Mizugaki, "Improvement of Single-Electron Digital Logic Gates by Utilizing Input Discretizers," IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol. E99-C, no. 2, pp. 285-292, 2016.

DOI: 10.1587/transle.E99.C.285

Tran T. T. Huong and Y. Mizugaki, "A single-electron hysteretic inverter designed for enhancement of stochastic resonance," IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 12, no. 17, pp. 20150527-1-12, 2015.

DOI: 10.1587/elex.12.20150527

[学会発表](計25件)

森林誠, 松本和彦, Tran Thi Thu Huong, 守屋雅隆, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直, "3電極間に滴下法で作製した金ナノ粒子ランダム配列における単一電子帯電効果," 第94回低温工学・超電導学会研究発表会, 2017年5月23日, タワーホール船堀(東京都・江戸川区)

Y. Mizugaki and Tran T. T. Huong, "Numerical Study on Stochastic Resonance in a Single-Electron Hysteretic Inverter," 8th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics, 2017年3月6-7日, 東北大学(宮城県・仙台市)

Y. Mizugaki and T. Watanabe, "Design and Operation of Single-Flux-Quantum Bipolar Digital-to-Analog Converters," Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2017), 2017年2月20-21日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

Y. Mizugaki, Y. Urai, and H. Shimada, "Thermally-Fluctuated Single-Flux-Quantum Pulse Intervals Reflected in Input-Output Characteristics of a Double-Flux-Quantum Amplifier," 29th International Symposium on Superconductivity (ISS 2016), 2016年12月13-15

日,東京国際フォーラム(東京都・千代田区)

M. Moriya, K. Matsumoto, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki, "Fabrication of a single-electron device by successive dispersion of two different-sized nanoparticles," The Irago Conference 2016 (Interdisciplinary Research And Global Outlook), 2016年11月1-2日, 電気通信大学(東京都・調布市)

荒井祐真, 渡邊智希, 澤田和直, 島田 宏, 水柿義直, "SFQ-D/A 変換器で用いる SFQ パルス繰り返し周波数の向上," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13日, 朱鷺メッセ委(新潟県・新潟市)

松本和彦, Tran Huong, 守屋雅隆, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直, "3 電極間に滴下法で作製した金ナノ粒子膜における単一带電効果," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13日, 朱鷺メッセ委(新潟県・新潟市)

Y. Mizugaki, T. Watanabe, and H. Shimada, "Single-Flux-Quantum Bipolar Digital-to-Analog Converter Comprising Polarity-Switchable Double-Flux-Quantum Amplifier," Applied Superconductivity Conference (ASC2016), 2016年9月4-9日, デンバー(アメリカ合衆国)

Huong T. T. Tran, K. Matsumoto, M. Moriya, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki, "Fabrication of high temperature capacitively- and resistively-coupled single electron transistors using gold nanoparticles," 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2016), 2016年8月22-25日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市)

守屋雅隆, Tran Thi Thu Huong, 松本和彦, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直, "それぞれ粒径の異なるナノ粒子を散布して作製した2種類の単一電子素子," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2016年4月21日, 山形大学(山形県・米沢市)

守屋雅隆, Tran Thi Thu Huong, 松本和彦, 島田 宏, 木村康男, 平野愛弓, 水柿義直, "繰り返し金ナノ粒子を散布することで作製した単一電子素子," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月21日, 東京工業大学(東京都・目黒区)

渡邊智希, 水柿義直, "磁束バイアス線を廃止した ± 20 倍 DFQ アンプの試作と動作検証," 電子情報通信学会総合大会, 2016年3月15日, 九州大学(福岡県・福岡市)

M. Moriya, Tran T. T. Huong, K. Matsumoto, H. Shimada, Y. Kimura, A. Hirano-Iwata, and Y. Mizugaki, "Characteristics of single electron

device fabricated by repeated dispersion of gold nano particles," The Joint Symposium of 10th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, and 7th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics, 2016年3月1-3日, 東北大学(宮城県・仙台市)

澤田和直, 渡邊智希, 島田 宏, 水柿義直, "SFQ マスク ROM 用各種メモリセルの設計と動作検証," 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2016年1月21日, 機械振興会館(東京都・港区)

渡邊智希, 島田 宏, 水柿義直, "両極性出力型 DFQ アンプの提案と動作実証," 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2016年1月21日, 機械振興会館(東京都・港区)

Tran T. T. Huong and Y. Mizugaki, "Design of single-electron hysteretic inverter," International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2015), 2015年11月17-20日, NTT 物性科学基礎研究所(神奈川県・厚木市)

浦井芳彰, 島田 宏, 水柿義直, "DFQ アンプの性能評価における SFQ パルス列の入力方法," 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2015年8月4日, 横浜国立大学(神奈川県・横浜市)

K. Sawada, T. Watanabe, H. Shimada, and Y. Mizugaki, "Design and Operation of ROM-Dedicated Single-Flux-Quantum Cell Comprising Splitters and Confluence Buffers," 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), 2015年7月6-9日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

T. Watanabe, H. Shimada, and Y. Mizugaki, "Modified Double-Flux-Quantum Amplifier for Bipolar Voltage Multiplication," 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), 2015年7月6-9日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

徳山貴斗, 島田 宏, 水柿義直, "微小 AI トンネル接合列内での接合特性の均一性向上を目指した SiO₂ 援用 Dolan 法の提案と評価," 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2015年4月17日, 東北大学(宮城県・仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水柿 義直 (MIZUGAKI, Yoshinao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号: 30280887

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

島田 宏 (SHIMADA, Hiroshi)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授
研究者番号： 60216067