

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20540312

研究課題名(和文) 磁束量子ビットの単一および結合系の回路形式の比較研究

研究課題名(英文) Comparative study of systems of a single flux qubit and coupled flux qubits

研究代表者

島津 佳弘 ( SHIMAZU YOSHIHIRO )

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70235612

研究成果の概要(和文)：

超伝導金属で作られる磁束量子ビット回路は、量子コンピュータ等への応用が期待されることから注目されている研究対象である。本研究課題では、過去に研究されていなかった新しい形態の磁束量子ビット回路を主たる研究対象として、試料の作製、超低温下での動作測定、理論解析を行った。特に、エネルギーレベルを制御することのできる量子ビット回路に関して、エネルギーレベルの広範囲の制御性の実証、第2、第3励起状態への励起エネルギースペクトルの測定などの顕著な成果を得た。

研究成果の概要(英文)：

A flux qubit system is a promising candidate for realization of a quantum computer. We investigated novel flux-qubit systems that had not been investigated. Some remarkable results were obtained experimentally for a double-loop four-Josephson-junction flux qubit, wherein the potential barrier height can be varied *in situ* via control flux, resulting in the tunability of the energy gap. We observed microwave resonances associated with the first, second, and third excited states. These quantum levels may allow novel applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：低温物性実験

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：量子ビット、ジョセフソン接合、メゾスコピック系、量子計算、超伝導素子

## 1. 研究開始当初の背景

量子ビットとは、量子力学的重ね合わせ状態が実現される量子力学的2準位系である。これを使って、量子コンピュータや量子通信、量子暗号などの、量子力学に基づく新しい科学技術が実現されると考えられることから、社会的波及効果も非常に大きい研究対象で

ある。量子ビットの実現方法は数多く提案されているが、その中でも、微小ジョセフソン接合で構成される超伝導量子ビットは、集積可能性などの点で優位性をもち、約10年の間に、めざましい実験的および理論的進展がみられていた。特に、磁束量子ビットとして知られている、3個のジョセフソン接合を含

む超伝導ループの形の系 (3-JJ 量子ビット) が重点的に研究され、量子ビットとしての性能が向上してきていた。しかしながら、2ビットまでの素子の基本動作の確認が行われた段階であり、超伝導量子ビットの研究分野に限っても、どのような形態の素子がコヒーレンス性や制御性などの点で優位であるかは未解明の状態であり、いろいろな回路形式の超伝導量子ビットについて動作測定を行い、コヒーレンス時間などを比較検討することが重要な課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、過去にまだ実験結果が報告されていない回路形式の磁束量子ビットおよび磁束量子ビット間の結合回路を研究し、過去の単一および結合系の実験結果と比較検討することを通じて、量子ビットとしての性能 (制御性、コヒーレンス時間、信号対雑音特性など) の優れた回路形式を探究することを目的とした。具体的には、ジョセフソン接合に特有のジョセフソンインダクタンスで DC-SQUID と結合した 3-JJ 量子ビット、基底状態と励起状態のエネルギーレベルの間隔 (エネルギーギャップ  $\Delta$ ) を制御可能な量子ビット (これは、4 個のジョセフソン接合で構成されるので、以下では 4-JJ 量子ビットと記す)、可変結合器で結合した 2 ビット結合系などを当初の研究対象として考えた。

## 3. 研究の方法

本研究では、多くの形態の試料を作製し、超低温における素子の動作測定を実施し、得られた実験結果を理論解析の結果と比較考察することを繰り返して、研究を遂行した。ここでは、試料作製方法と、測定方法の概略を述べる。

(1) 磁束量子ビット試料は、電子線リソグラフィ法を用いて作製した。微小ジョセフソン接合を作るために、まず、2 層のレジスト (PMGI-SF7, PMMA) を Si 基板上に塗布し、電子線描画と現像によりエアブリッジ構造 (レジストによる架橋構造) を作製した。次に、アルミニウムを 2 回、基板に対して異なる蒸着方向で、25nm ずつ蒸着した。1 回目の蒸着の後で、低圧の酸素を数分間真空容器内に導入し、薄いアルミニウム酸化膜を形成した。これが、トンネル障壁としてはたらく。量子ビットを形成するジョセフソン接合と超伝導配線の材質はアルミニウムであり、測定のための配線を接続するパッド部分の薄膜の材質は金である。これらの金属の蒸着には、電子ビーム蒸着の手法を用いた。量子

ビットとしての動作に影響する重要なパラメータが、ジョセフソン接合の面積と抵抗値である。電界放射型走査電子顕微鏡を用いた観察により接合の面積を測定した。接合抵抗値は、量子ビット試料の近くに同時に作製したジョセフソン接合試料の抵抗を測定することで評価した。

(2) 試料の動作測定は、希釈冷凍機を使って 20mK 程度までの低温に冷却して行った。量子ビットの作る磁束を DC-SQUID を使って読み出すために、DC-SQUID のスイッチング電流 (臨界電流) 測定および、スイッチング確率測定を行った。スイッチング電流測定的时候は、DC-SQUID に、バイアス電流を例えば周波数 8 kHz の非対称三角波の形で印加し、DC-SQUID に電圧が発生したときのバイアス電流値を自作回路により測定した。スイッチング確率測定的时候は、DC-SQUID に数 10ns の幅の電流パルスを印加し、電圧状態へスイッチングする確率を、自作回路とユニバーサルカウンターの組み合わせにより測定した。試料への磁場の印加には、NbTi 線で作った自作の小型超伝導マグネットを用いた。マグネットに流す電流および、4-JJ 量子ビットに制御磁束を与えるための電流を発生するために、自作の電圧電流変換回路および GPIB 制御の電圧発生装置を使用した。エネルギー分光測定のためにマイクロ波を印加するときは、試料から数 mm 離れたループアンテナ、または、試料を載せた高周波基板上に作製したマイクロストリップラインを使用した。ノイズを低減するために、測定用導線とマグネットの導線にはマイクロ波帯域以上の信号を低減する自作フィルターを低温部に挿入した。磁場ノイズ、電磁波ノイズ、および外部からの輻射 (熱雑音) を低減するために 2 重の銅製輻射シールド、鉛の超伝導シールド、パーマロイシールド、およびアルミ板シールドを使用した。

## 4. 研究成果

本研究において、4-JJ 量子ビットに関して、当初予想していた以上の成果が得られたので、以下ではその成果の概要について述べる。

図 1 の中の太線で示した回路が、4-JJ 量子ビット試料の回路図である。2 個のループ内の磁束を磁束量子  $\Phi_0$  で規格化したものを、 $f_1$ 、 $f_2$  とする。制御磁束  $f_2$  を変化することにより、エネルギーギャップ  $\Delta$  を制御できることが、この系の主な特徴である。系のポテンシャルエネルギーは、4 個の接合のもつジョセフソン結合エネルギーの和であり、このポテンシャルを 3-JJ 量子ビットの場合と比べる

と、3-JJ 量子ビットのときのループ内の磁束  $f$  が  $f_1 + f_2/2$  に、面積比  $\alpha$  が  $2\beta\cos(\pi f_2)$  に置き換わっていることがわかる。ポテンシャルの形状は  $f_1$  と  $f_2$  によって変化するが、通常の磁束量子ビットで利用される対称 2 重井戸ポテンシャルとなるのは、 $f_1 + f_2/2$  が整数または半整数のとき（かつ、バリア高さが正のとき）である。このときのポテンシャル障壁の高さを決定する有効パラメータは

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{4\beta\cos(\pi f_2)}{1 + \alpha_2}$$

である。 $\alpha_{\text{eff}}$  が大きくなると、ポテンシャル障壁が高くなりトンネル確率が減少するため、エネルギーギャップ  $\Delta$  が小さくなる。一方、 $\alpha_{\text{eff}} < 0.5$  となると、ポテンシャル障壁が消失して、ポテンシャルは単一井戸構造となる。

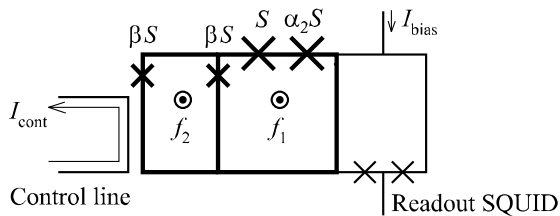


図 1 : 測定した試料の回路図。×はジョセフソン接合を表す。太線で示した部分が 4-JJ 量子ビットであり、制御電流ラインと信号読み出し用の DC-SQUID が量子ビットと結合している。 $S$ 、 $\beta S$ 、 $\alpha_2 S$  は各接合の面積、 $\alpha_2$  と  $\beta$  は接合の面積比を表す。

量子ビットの右側のループに流れる巡回電流の反転が、通常の磁束量子ビットの状態変化に対応する。これを、DC-SQUID のスイッチング電流測定から得られる磁束信号として検出した。図 2 は、このときの磁束信号の電磁石電流  $I_{\text{mag}}$  に対する依存性を、いろいろな制御電流  $I_{\text{cont}}$  においてプロットしたものである。巡回電流の反転を示すステップがしだいに 사라かになり消失するように見えるが、このふるまいが、ポテンシャルバリアの高さの変化によって説明される。

図 2 で示される領域においてエネルギー分光測定を行ったところ、従来の研究で測定されてきた、第一励起状態への励起スペクトルに加えて、いくつかの励起スペクトルが、明瞭に観測された。測定結果を理解するために、この系のエネルギーレベルを理論計算により求め、実験結果と比較した。その結果、測定されたスペクトルは、第 2 および第 3 励

起状態への励起スペクトルが 1 光子吸収および 2 光子吸収の形で現れているものと考えられることがわかった。図 3 は、これらの励起状態への励起エネルギーの ( $I_{\text{mag}}$  の関数としての) 最小値を  $I_{\text{cont}}$  に対してプロットしたものである。実験結果が理論計算の結果とほぼ一致していることがわかる。

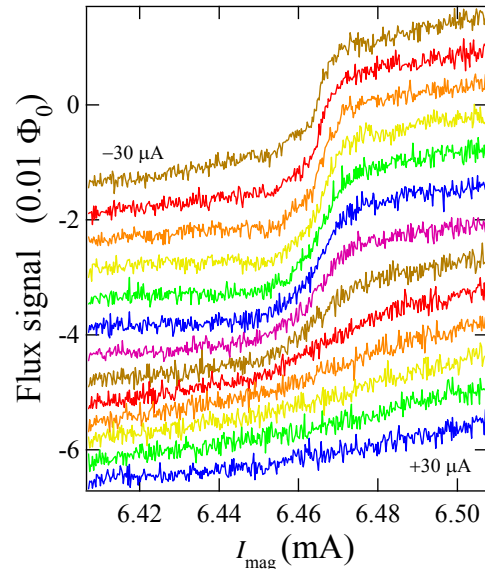


図 2 : DC-SQUID で測定した磁束信号の電磁石電流  $I_{\text{mag}}$  に対する依存性。 $-30\mu\text{A}$  から  $30\mu\text{A}$  までのいろいろな制御電流  $I_{\text{cont}}$  における結果を上下にずらして図示している。ステップ状の信号が、量子ビットの巡回電流の反転を表す。

4-JJ 量子ビットにおける第 2 および第 3 励起状態への励起スペクトルの測定結果は、本研究によって初めて得られたものである。3 個以上の量子状態を利用することで、光子生成、量子ビット系の冷却などの量子情報技術分野での応用が可能となることが理論的に提案されている。本研究結果は、これらの応用につながる成果である。

解析の結果、この実験においては、通常の磁束量子ビットで使われる 2 重井戸ポテンシャル領域から単一井戸ポテンシャル領域への遷移領域での測定が実現していることがわかった。過去の磁束量子ビットの研究は、3-JJ 量子ビットの場合の一例を除いて、2 重井戸ポテンシャル領域のみで行われてきた。本研究結果は、単一井戸領域においても比較的簡単な手法で、3-JJ および 4-JJ 量子ビットに対して量子操作および読み出しができることを初めて示すものである。単一井戸領域

で量子ビットを操作することは、動作速度およびコヒーレンス時間の点で非常に有利であると考えられる。今後、これらの領域でのコヒーレンス時間の測定へ向けて研究を進めることを予定している。それによって、コヒーレンス時間の向上という、量子ビットの研究における重要な課題の解決につながる成果が得られるものと予想する。

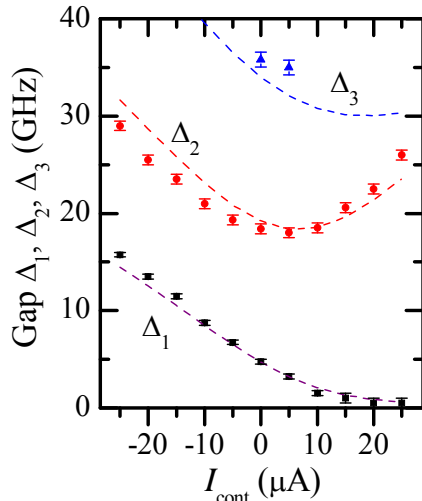


図3：第1、第2、第3励起状態への励起エネルギーの最小値を $\Delta_i$ として示す。破線は理論計算の結果である。

#### 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 15 件)

- ① Y. Shimazu: Tunability of Excited-State Energy Levels of Four-Josephson-Junction Circuit in Crossover from Double-Well to Single-Well Potential, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 80, 2011, 054701 (7pp).
- ② Y. Shimazu, K. Ochiai, E. Shinozaki: Doublet splitting due to intercell tunneling in three-Josephson-junction flux qubit, *Physica C*, 査読有, Vol. 470, (2010) pp. 1555–1557.
- ③ 島津佳弘、落合慧、篠崎瑛二、中島正揮、高橋真起: 4個のジョセフソン接合で作られた量子ビットにおける2重井戸から単一井戸へのポテンシャル制御, 第23回量子情報技術研究会資料, 査読無, 2010, pp. 172-175.
- ④ 島津佳弘、落合慧、篠崎瑛二、中島正揮、高橋真起: エネルギーギャップを制御できる4接合量子ビットにおける単一井戸領域の測定, 日本物理学会講演概要集第65巻第2号第4分冊, 査読無, 2010, p. 635.
- ⑤ Y. Shimazu, K. Ochiai, E. Shinozaki, T.

Inayama, M. Nakajima, T. Oouchi, M. Takahashi: Large tunability of energy gap and energy-level splitting in double-loop four-Josephson-junction flux qubit, *Proceedings of 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology*, 査読無, 2010, p. 152.

⑥ Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: Spectroscopy of Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 78, 064708 (5 pp) (2009).

⑦ Y. Shimazu, Y. Saito, Z. Wada: Characterization of double-loop four-Josephson-junction flux qubit, *Physica C*, 査読有, Vol. 469, pp. 1608-1611 (2009).

⑧ Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: Four-Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, Vol. 150 (2009) 022075 (4pp).

⑨ Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: Spectroscopy of Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 78 (2009) 064708 (5 pp).

⑩ 島津佳弘、落合慧、前田憲宏、篠崎瑛二: バリア高さを制御できる4接合磁束量子ビットのエネルギー分光, 日本物理学会講演概要集第4分冊, 査読無, 2009, p. 681.

⑪ Y. Shimazu, N. Maeta, K. Ochiai, E. Shinozaki, Y. Saito, Z. Wada: Spectroscopy of double-loop four-Josephson junction flux qubit with tunable energy gap, *Proceedings of 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology*, 査読無, 2008, p. 113.

⑫ 島津佳弘、齊藤友貴、和田全平: エネルギーギャップを制御することのできる超伝導磁束量子ビットの実験, 第18回量子情報技術研究会研究会資料, 査読無, 2008, pp. 166-169.

[学会発表] (計 12 件)

① Y. Shimazu: Excited-State Energy Levels of Four-Josephson-Junction Circuit in Crossover from Double-Well to Single-Well Potential, *International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011)*, NTT 厚木研究開発センター, 2011.1.11.

② 島津佳弘、落合慧、篠崎瑛二、中島正揮、高橋真起: 4個のジョセフソン接合で作られた量子ビットにおける2重井戸から単一井戸へのポテンシャル制御, 第23回量子情報技術研究会, 東京大学小柴ホール, 2010. 11.15.

③ 島津佳弘、落合慧、篠崎瑛二、中島正揮、高橋真起: エネルギーギャップを制御できる4接合量子ビットにおける単一井戸領域の測定, 日本物理学会2010年秋季大会, 大阪府

立大学, 2010.9.23.

④ Y. Shimazu, K. Ochiai, E. Shinozaki, T. Inayama, M. Nakajima, T. Oouchi, M. Takahashi: Large tunability of energy gap and energy-level splitting in double-loop four-Josephson-junction flux qubit, 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 一橋記念講堂 (東京都), 2010.4.8.

⑤ Y. Shimazu, K. Ochiai, E. Shinozaki: Doublet splitting due to intercell tunneling in three-Josephson-junction flux qubit, 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS2009), つくば国際会議場, 2009.11.4.

⑥ 島津佳弘、落合慧、前田憲宏、篠崎瑛二：バリア高さを制御できる4接合磁束量子ビットのエネルギー分光、日本物理学会第64回年次大会、立教大学(池袋) 2009.3.27.

⑦ Y. Shimazu, N. Maeta, K. Ochiai, E. Shinozaki, Y. Horikawa, M. Onda, K. Tomita, K. Yamamura: Energy Spectroscopy of Double-Loop Josephson-Junction Flux Qubit, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2009), Atsugi, 2009.1.21.

⑧ Y. Shimazu, N. Maeta, K. Ochiai, E. Shinozaki, Y. Saito, Z. Wada: Spectroscopy of double-loop four-Josephson junction flux qubit with tunable energy gap, International Symposium on Physics of Quantum Technology, Nara, 2008.11.27.

⑨ Y. Shimazu, Y. Saito, Z. Wada: Characterization of double-loop four-Josephson-junction flux qubit, 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), Tsukuba, 2008.10.29.

⑩ Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: Double-loop Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap, 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO '08), Saitama, 2008.8.27.

⑪ Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: Four-Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap, 25th International Conference on Low Temperature Physics, Amsterdam, 2008.8.8.

⑫ 島津佳弘、齊藤友貴、和田全平：エネルギーギャップを制御することのできる超伝導磁束量子ビットの実験、第18回量子情報技術研究会(QIT18)、東京大学, 2008.5.23.

[図書] (計2件)

① Y. Shimazu, Y. Saito, and Z. Wada: "Double-loop Josephson-Junction Flux Qubit with Controllable Energy Gap", in "Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology", ed. S. Ishioka and K. Fujikawa, pp.

254-257, 総ページ数 361, (2009, World Scientific Publishing).

② Y. Shimazu, T. Niizeki: "Characteristics of a switchable superconducting flux transformer using a DC-SQUID", in "Controllable quantum states", ed. H. Takayanagi, J. Nitta, H. Nakano, pp. 97-102, 総ページ数 420, (2008, World Scientific Publishing).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

島津 佳弘 (SHIMAZU YOSHIHIRO)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：70235612

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：