

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540317

研究課題名(和文) 微小ジョセフソン接合デバイスにおける量子状態の操作と量子コヒーレンスに関する研究

研究課題名(英文) Study on quantum-state manipulation and quantum coherence in small-Josephson-junction devices

研究代表者

島津 佳弘 (SHIMAZU, Yoshihiro)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70235612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：微小なジョセフソン接合(超伝導体のトンネル接合)を含む超伝導デバイスは、量子力学に従った動作をするので、量子コンピュータの構成要素である量子ビットとしての応用可能性の観点から注目されている。本研究では、微小ジョセフソン接合デバイスの一種である磁束量子ビットデバイスとその測定デバイスであるDC-SQUIDが強く結合した系に関して、量子状態のエネルギーとマイクロ波励起下での量子状態の時間変化を調べ、高次のサイドバンド遷移とよばれる現象を観測し、その起源を解明した。この現象を利用することでさまざまな応用につながる高度な量子状態操作が可能になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Superconducting qubits consisting of ultrasmall Josephson junctions have attracted much interest for the implementation of a scalable quantum computer. We investigated a superconducting flux qubit strongly coupled to a DC-SQUID that is used for readout of the qubit. Higher-order red and blue sideband transitions were clearly observed in spectroscopic measurement. The origin of these transitions was found to be a SQUID plasma mode. Manipulation of the quantum states was demonstrated as Rabi oscillations on the carrier transition and sideband transitions. The observation of the sidebands up to  $|M| = 3$ , where  $M$  represents the change in the quantum number of the resonator state, is consistent with the calculated transition matrix elements between the quantum states of the coupled system. Our results may provide a basis for future experiments manipulating many composite levels, including demonstration of quantum gates using sideband transitions.

研究分野：低温物性実験

キーワード：ジョセフソン接合 超伝導デバイス 量子ビット 量子コンピュータ 量子コヒーレンス

## 1. 研究開始当初の背景

サブミクロンスケールの微小ジョセフソン接合は、巨視的スケールで量子トンネル現象や量子コヒーレンス現象が出現する点が物理的に注目を集め、1980年代から活発に研究が進められてきた。1999年前後には、微小ジョセフソン接合1個または数個を組み合わせた微小超伝導回路が、量子コヒーレンスを比較的容易に実現できることと、優れた制御性を伴うことが実証された。ほぼ同時期に、量子コンピュータの構成要素である「量子ビット」としての応用可能性が広く認識されるようになったことにより、微小ジョセフソン接合デバイスは、量子情報処理デバイスの一例としての観点からも、注目を集めていた。さらに2個の状態を量子ビットとして使うだけでなく、3個以上の量子状態を利用してレーザー動作等の量子現象を実現する舞台としての関心も高まり、いわゆる「人工原子」としての応用を視野に入れた物理的研究が活発に行われていた。微小ジョセフソン接合デバイスを量子情報処理に活用する上での主要な問題点としては、量子コヒーレンス時間の向上、複数の量子ビットを使って効率的な量子論理ゲートを作る方法の開発、量子ビット間の情報伝達方法の開発などがあげられていた。

申請者は、基本的な3接合磁束量子ビットの測定において、なんらかの原因で生じた調和振動子モード(共振器モード)が量子ビットと結合したことによって作られたと解釈される、Blue sidebandのエネルギ分光と、それに付随するラビ振動の観測に成功していた。この現象は、量子ビットが他の自由度と結合していることを示すが、このような結合系においては、結合によって作られる複数の量子状態を操作することで、さまざまな応用につながる多彩な量子操作が可能となる点と、量子ビットと結合した系を、量子ビットの間の情報の媒介としても利用できる点に注目し、本研究計画を立案した。

## 2. 研究の目的

観測された Sideband の原因である調和振動子モードの生成メカニズムを明らかにすることを最初の目的とした。さらに、基本ラビ振動(量子ビット固有の2状態間の振動)と Sideband のラビ振動を、マイクロ波の強度および周波数の関数として詳細に調べ、従来このような系の解析に使われているモデルの妥当性とその限界を明らかにすること、基本ラビ振動と Sideband のラビ振動のコヒーレンス時間を、試料パラメータや測定条件を変えながら測定し、その実験結果をもとに、これらの振動に固有のコヒーレンス時間に影響する要因を調べ、コヒーレンス時間を改善するための指針を得ること、Sideband に起因する量子状態を使った複雑な量子操作を

実現することも研究の目的とした。

また、申請者により発見されていた新現象である、3接合磁束量子ビットにおける新規なレベル分裂現象のメカニズムを解明し、分裂により生成した3個以上の量子状態の操作を実現することも、当初の目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究で主に対象としたデバイスの構造を図1に示す。電子線リソグラフィとAlの蒸着によって試料作製を行った。

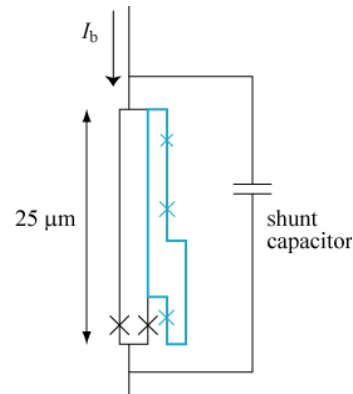


図1 主たる研究対象とした微小ジョセフソン接合デバイス試料の構造

図中の x は微小ジョセフソン接合を表す。接合面積は約  $0.03 \mu\text{m}^2$  である。3個の接合を含むループ(青線)が3接合磁束量子ビットとして動作する。この量子ビットの磁束信号を、一辺を共有して結合したDC-SQUIDで読み出す。読み出し方法として、臨界電流測定と、パルスバイアス電流( $I_b$ )を印加したときの電圧状態へのスイッチング確率( $P_{sw}$ )測定の2種類を採用した。DC-SQUIDに並列に接続されたキャパシタ(シャントキャパシタ)は、ノイズ低減と、量子コヒーレンス向上の効果をもつものである。実験は、希釈冷凍機を用いて約 20 mK の低温で行った。量子ビットの動作点を制御するために、超伝導マグネットで磁束を印加し、量子状態を制御するために、20 GHz までのマイクロ波を印加した。ラビ振動測定の場合は、マイクロ波パルスを加えた直後にパルスバイアス電流を印加し、そのときのスイッチング確率を、マイクロ波パルスの時間幅の関数として測定した。量子状態のエネルギをマイクロ波分光測定で得られる共鳴信号から求め、量子コヒーレンスをラビ振動の持続時間をもとに評価した。

実験結果の解析のために、系の量子状態の理論的解析(数値計算)を、量子ビットと調和振動子の結合系のハミルトニアンを使って、対角化計算により量子状態を求める方法で実行した。計算方法の詳細は、論文(1)と(2)に示されている。

#### 4. 研究成果

ある一定の磁束バイアスにおいて、100 ns 幅のマイクロ波を印加したときのスイッチング確率のマイクロ波周波数依存性を図2に示す。観測されたピークが分光ピークであり、量子状態の励起エネルギーに対応するものである。この図では、16.7 GHz の量子ビットの励起エネルギーの上下に約 0.6 GHz の間隔で、Blue sideband と Red sideband が出現し、それぞれ、2 次のサイドバンドまでが観測されている。後に、量子ビットと DC-SQUID の結合度を強めた試料において、3 次のサイドバンドまでを顕著に観測することに成功した。

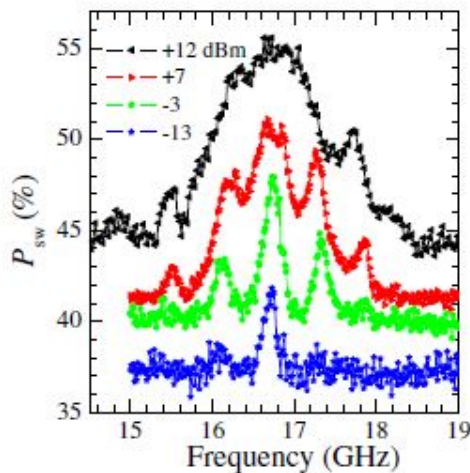


図2 異なるマイクロ波強度における DC-SQUID のスイッチング確率 ( $P_{sw}$ ) の、マイクロ波周波数依存性

このようなサイドバンドは、量子ビットと調和振動子の結合によって説明することができる。図3は結合系のエネルギーダイアグラムであり、量子ビットの基底状態と励起状態をそれぞれ  $g$  と  $e$  で表し、調和振動子の量子数を整数  $N$  として、 $|g, N\rangle$  や  $|e, N\rangle$  として結合系の状態を記述している。通常の量子ビットの励起とサイドバンド遷移は、図の矢印で示すような量子状態間の遷移として説明することができる。遷移の周波数は、 $\nu_0 + M\Omega$  と表され、ここで  $\nu_0$  は量子ビットの励起エネルギー、 $\Omega$  は調和振動子のエネルギー間隔である。 $M$  は、調和振動子の量子数変化であり、光子数変化ともよばれるものである。

ここで観測された  $\Omega = 0.6\text{GHz}$  のモードの起源を調べるために、この周波数付近で観測される分光ピークを、DC-SQUID に与える磁束およびバイアス電流の関数として調べた。図4は、分光ピークの周波数（共鳴周波数）の磁束依存性の実験結果であり、曲線は DC-SQUID のもつジョセフソンインダクタンスとシャントキャパシタンスの作る LC 共鳴モード（SQUID plasma mode とよばれる）の

共鳴周波数である。実験結果が理論曲線とよく一致していることから、調和振動子モードの起源が SQUID plasma mode であると結論することができた。

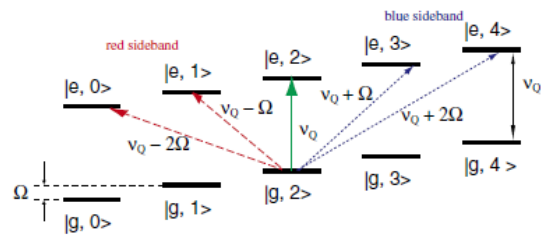


図3 量子ビットと DC-SQUID の結合系のエネルギーダイアグラム

磁束量子ビットと DC-SQUID の結合系における1次のサイドバンド遷移はデルフト大学のグループにより既に報告されているが、2次や3次の高次サイドバンドの報告は、本研究が初めてである。このように高次サイドバンドが観測されるためには、結合度が十分強くないといけない。本研究対象の試料では、磁束量子ビットが DC-SQUID の一本の腕と結合した構造をもつ。この試料構造が強い結合度をもたらす要因であることが、実験・理論の両面から判明した。ただし、このような量子ビットと DC-SQUID の強い結合は、量子コヒーレンスを低減する要因になる点にも注意することが必要である。

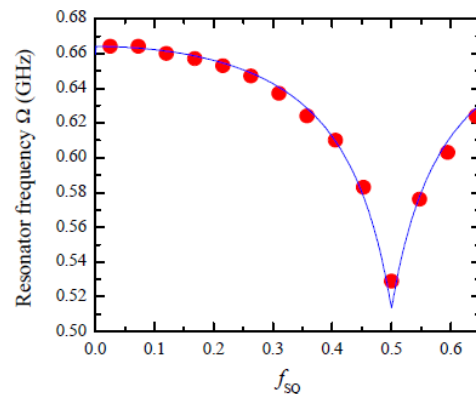


図4 分光測定で得られた共振器周波数 ( ) と SQUID plasma mode の周波数の理論曲線の比較

3 次のサイドバンド遷移の観測結果を理論的に理解するために、サイドバンド遷移の遷移行列要素を計算した。図5は、遷移行列要素  $T(n, M)$  の計算結果である。ここで  $n$  は始状態の共振器量子数、 $M$  は光子数変化である。この計算では、結合度を  $g = 0.15\text{GHz}$  と仮定したが、この値は、試料で実現されていると考えられる程度の結合度である。図で示され

るように、 $M = 3$  までの遷移行列要素は無視できない大きさをもっているため、3次までのサイドバンド遷移が観測されたことが理論的に説明できることがわかった。結合度の正確な値の実験的決定は、今後の課題である。また、遷移行列要素を、各遷移のラビ振動周波数を測定することで、実験的に決定することができるので、これは今後の課題と考えられるが、結合度が強い場合は量子コヒーレンス時間が短いために、この測定は容易ではないことが予想される。

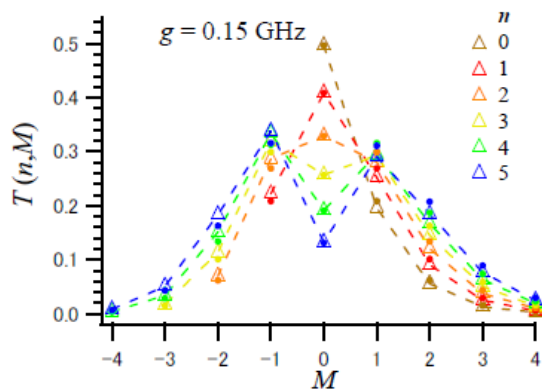


図5 結合度を  $g = 0.15$  GHz と仮定したときの遷移行列要素。 $M$  は光子数変化、 $n$  は始状態の共振器量子数である。

量子状態が実時間制御できることを示す現象として、サイドバンド遷移に伴うラビ振動を観測することができた。そして、これらの振動の減衰時間に基づいて量子コヒーレンス時間を評価した。図4の黒線は通常のラビ振動、青線と赤線は、それぞれ、Blue sideband と Red sideband のラビ振動である。図示されたように sideband のラビ振動は通常のラビ振動より著しく遅く、かつ、Blue sideband の振動は Red sideband の振動よりもやや遅い。これらの振動周波数の比は、遷移確率により理論的に説明することができる。これに関する理論的考察も行い、論文(2)で発表した。

本研究により、量子ビットと結合した調和振動子モードの発生機構と、両者の間に強い結合度が得られる原因が明らかとなった。そして、結合系の量子状態の実時間制御を実証することができた。このような結合系は、量子ビットの読み出しや量子論理ゲートの作製に応用できることが知られているので、本研究成果は量子情報処理への応用の観点からも大いに意義のある結果である。特に重要な成果は、2次、3次という高次のサイドバンド遷移を初めて磁束量子ビットと調和振動子 (DC-SQUID) の結合系で観測した点である。このような現象を観測するために必要な条件 (試料構造と試料の設計パラメータ) が、本研究で明らかになった。本研究で観測された高次サイドバンドの応用方法につい

ては、今後理論的検討が必要であるが、1次のサイドバンド遷移の利用だけでは実現できないような高度な量子状態制御が可能となると考えられる。2次サイドバンド遷移に伴うラビ振動の実現を示唆する実験結果も、本研究期間に得られたが、この実験結果を明確に理解することは、今後の課題である。

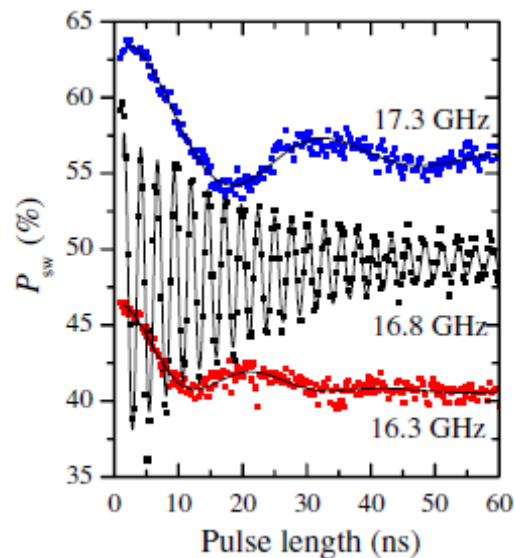


図6  $P_{sw}$  の、マイクロ波時間幅に対する依存性。黒、青、赤は、それぞれ通常のラビ振動、Blue sideband のラビ振動、Red sideband のラビ振動を示す。

## 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10件)

- (1) Y. Shimazu, R. Shirasaki, S. Toda, H. Yamanashi, "Observation and calculation of higher-order sideband transitions in a flux qubit coupled to a SQUID-based resonator", J. Phys.: Conf. Ser. **568**, 052030 (2014), 査読有 doi:10.1088/1742-6596/568/5/052030
- (2) Y. Shimazu, M. Takahashi, N. Okamura, "Observation of higher-order sideband transitions and first-order sideband Rabi oscillations in a superconducting flux qubit coupled to a SQUID plasma mode", J. Phys. Soc. Jpn., **82**, 074710 (2013), 査読有 doi:10.7566/JPSJ.82.074710
- (3) Y. Shimazu, S. Toda, M. Takahashi, N. Okamura, "Higher-order sideband transitions and sideband Rabi oscillations in a superconducting flux qubit coupled to a SQUID plasma mode", Abstracts of International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, p. 165 (2013), 査読無

(4) Y. Shimazu, M. Nakajima, M. Takahashi, N. Okamura, K. Yoshiyama, "Simulation of an asymmetric lineshape of a resonant dip observed in a switching-current measurement of a superconducting flux qubit", Physics Procedia, **27**, 360 (2012), 査読有  
doi:10.1016/j.phpro.2012.03.485

〔学会発表〕(計8件)

(1) Y. Shimazu, R. Shirasaki, S. Toda, H. Yamanashi: "Observation and calculation of higher-order sideband transitions in a flux qubit coupled to a SQUID-based resonator", 27th International Conference on Low Temperature Physics, 2014年8月8日, ブエノスアイレス (アルゼンチン)

(2) 島津佳弘、白崎良演、戸田駿一、山梨晴貴: "磁束量子ビットとDC-SQUIDの結合による高次サイドバンド遷移の観測と理論計算", 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月9日、中部大学(愛知県春日井市)

(3) Y. Shimazu, S. Toda, M. Takahashi, N. Okamura, "Higher-order sideband transitions and sideband Rabi oscillations in a superconducting flux qubit coupled to a SQUID plasma mode", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2013年11月27日, NTT 厚木研究開発センター(神奈川県厚木市)

(4) Y. Shimazu, N. Okamura, S. Toda, K. Murata, "Sideband transitions near symmetry point in three-Josephson-junction flux qubit", PRACQSYS 2012 (Principles and applications of control in quantum systems) 2012年9月12日、東京大学(東京都文京区)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.shi.ynu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

島津 佳弘 (SHIMAZU, Yoshihiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 70235612