

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03693

研究課題名(和文)量子ビット-調和振動子結合系におけるシュレディンガー猫状態の制御

研究課題名(英文)Schroedinger-cat-state control in a qubit-oscillator coupled system

研究代表者

布施 智子(Fuse, Tomoko)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター・主任研究員

研究者番号：00587925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：量子ビット-調和振動子結合系では、結合が非常に強い場合、基底状態がシュレディンガー猫状態となることが予測されている。

本研究では、実際に用いるキャパシタ、インダクタ、ジョセフソン接合から成る超伝導回路が、量子ビット-調和振動子結合系として記述できること、量子ビット-調和振動子結合系が外部の系に結合している場合でも結合の種類(電気的・磁氣的)によっては結合系の基底状態の“量子性”の消失を抑えることができることを示した。さらに、超伝導量子ビット-マイクロ波共振器結合回路の超強結合領域においてコヒーレンス測定を行い、位相緩和時間300 ns程度のRamsey干渉を測定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、超強結合から深強結合と呼ばれる非常に強い結合領域における、量子ビット-調和振動子結合回路の特性の一部を明らかにすることができた。特に深強結合領域ではこれまで、量子ビットが調和振動子(光子)との非常に強い結合により光子数揺らぎの影響を強く受けコヒーレンスの消失につながるものが危惧されていたが、本研究ではRamsey干渉の観測に成功しコヒーレントな状態発展を示すことができた。今後このような非常に強い結合領域における未知の物理現象を研究し、量子コンピューティングや量子センシングへと応用していく上で大きな意義のある結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In a qubit-oscillator coupled system with very strong coupling, it is predicted that the ground state will be a Schroedinger cat state.

We have shown that our superconducting circuit, composed of capacitors, inductors, and Josephson junctions, can be described as a qubit-oscillator coupled system. We have also shown that degrading of the “quantumness” in the ground state of the coupled circuit, when the qubit-oscillator coupled circuit is coupled to an environmental circuit, can be suppressed with some types of couplings (capacitive/inductive). Furthermore, we have measured coherence properties of superconducting qubit-microwave resonator coupled circuit, and successfully have observed Ramsey interference with the phase coherence time of about 300 ns.

研究分野：回路量子電磁力学

キーワード：回路量子電磁力学 超伝導量子回路 超強結合 深強結合

1. 研究開始当初の背景

近年、回路量子電磁力学 (circuit QED) で記述される、超伝導回路を用いた量子デバイスの研究進展が著しい。特に最近、Google、Intel、Microsoft、IBM 等の IT 関連大企業の参入や欧米・中国での巨額の研究予算が話題となり、注目が集まっている。この動向のきっかけとなった研究の一つが、超伝導回路における量子エラー訂正の実証実験 [1] である。この実験では、有望とされていた surface code [2] ではなく、cat code [3] を用いて量子エラー訂正を行っている。cat code は、原理的に無限のヒルベルト空間をもつ共振器中の光子のシュレディンガー猫状態に論理量子ビットをエンコードするため、surface code のように膨大な数の物理量子ビット (例えば 1 論理量子ビットあたり 10^4 個の物理ビット) で論理量子ビットを構成する必要がない。

また近年、量子力学の原理を利用した高感度センサーの研究が行われており、共振器量子電磁力学 (cavity QED) で記述される、空洞共振器中のリドベルグ原子のシュレディンガー猫状態を利用した電場センサーの実験 [4] などがある。circuit QED のセットアップは cavity QED のセットアップに比べ、設計の自由度が高くや作製も容易であるという利点があり、同様の原理を利用した高感度センサーとして期待される。

このような背景において、circuit QED で記述される量子ビット-共振器結合系においてシュレディンガー猫状態の量子制御を行うことは、きわめて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、非常に強い結合をもつ (いわゆる超強結合~深強結合の領域にある) 超伝導量子ビット-マイクロ波共振器結合系を用いて、我々の提案している理論提案に [5] に基づいたシュレディンガー猫状態の量子制御を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 量子ビット-調和振動子結合系では、結合が非常に強い (超強結合~深強結合と呼ばれる領域にある) 場合、基底状態がシュレディンガー猫状態となることが予言されている (量子 Rabi モデル)。そこで、本研究で用いるキャパシタ、インダクタ、ジョセフソン接合などから成る超伝導回路について、ラグランジアンからハミルトニアンを導き、この超伝導回路と量子 Rabi モデルとの関係を明らかにする。

(2) 量子ビット-調和振動子結合系は、制御・測定のため、外部の系との結合を必要とする。そこで、外部との結合の量子ビット-調和振動子結合系への影響を明らかにする。

(3) 量子ビット-調和振動子結合系を制御し応用するためには、系が十分長いコヒーレンス時間を持つことが必要であるが、結合が非常に強い (超強結合~深強結合と呼ばれる領域にある) 場合の量子ビット-調和振動子結合系 [6-7] については、これまで報告がなかった。そこで、結合が非常に強い (超強結合~深強結合と呼ばれる領域にある) 場合の量子ビット-調和振動子結合系のコヒーレンス特性を評価する。

4. 研究成果

(1) キャパシタ、インダクタ、ジョセフソン接合等から成る超伝導磁束量子ビット-LC 共振器結合回路について、ラグランジアンからハミルトニアンを導出した。この結果、導出されたハミ

ルトニアンは、量子 Rabi モデルと呼ばれる量子ビット-調和振動子結合系を記述するモデルでよく近似されることが分かった[8]。

(2) 外部との結合のある量子ビット-調和振動子結合系について、外部との結合の影響を調べた。この結果、量子ビット-調和振動子結合系の基底状態の「量子性」は、外部との結合に依存して減少するが、外部との結合を量子ビット-調和振動子結合の結合とは異なるタイプ(電氣的、磁氣的)にすることにより、その影響を抑制できることが分かった[9]。

(3) 結合が非常に強い(超強結合~深強結合と呼ばれる領域にある)場合の量子ビット-調和振動子結合系の基底状態と第一励起状態について、コヒーレンス時間を測定した。超強結合~深強結合領域では、量子ビットが非常に強く光子に結合しているため、光子揺らぎの影響によりコヒーレンスが観測されないことが危惧されていた。しかし本研究では、深強結合領域においてコヒーレンス測定を行い、300 ns 程度の Ramsey 干渉を観測することに成功した。より詳細な評価は今後の課題である[未発表]。

本研究により、超強結合から深強結合と呼ばれる非常に強い結合領域における、量子ビット-調和振動子結合回路の特性の一部を明らかにすることができた。当初の目的であったシュレディンガー猫状態の量子制御には至らなかったが、本研究の成果は、今後このような非常に強い結合領域における未知の物理現象を研究し、量子コンピューティングや量子センシングへと応用していく上で意義のあるものとなった。

参考文献

- [1] N. Ofek, et al., Nature 536, 441 (2016).
- [2] Austin G. Fowler, et al., Phys. Rev. A 86, 032324 (2012).
- [3] Zaki Leghtas, et al., Phys. Rev. Lett. 111, 120501 (2013).
- [4] A. Facon, et al., Nature 535, 262 (2016).
- [5] Z. Xiao*, T. Fuse*, et al., Phys. Rev. A, 95, 053824 (2017).
- [6] F. Yoshihara*, T. Fuse*, et al., Nature Phys. 13, 44 (2017).
- [7] 布施智子, 他, 日本物理学会誌 73, 21 (2018).
- [8] F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, M. Bamba, and K. Semba, Scientific Reports 12, 6764 (2022).
- [9] T. Shitara, M. Bamba, F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Semba, and K. Koshino, New Journal of Physics 23, 103009 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshihara F., Ashhab S., Fuse T., Bamba M., Semba K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6764
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10203-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Shitara Tomohiro, Bamba Motoaki, Yoshihara Fumiki, Fuse Tomoko, Ashhab Sahel, Semba Kouichi, Koshino Kazuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Nonclassicality of open circuit QED systems in the deep-strong coupling regime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 103009 - 103009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/ac2850	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 0件/うち国際学会 16件）

1. 発表者名 F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, M. Bamba, and K. Semba
2. 発表標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Ashhab, F. Yoshihara, T. Fuse, N. Yamamoto, A. Lupascu, and K. Semba
2. 発表標題 Speed limits for two-qubit gates with weakly anharmonic qubits
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, Kouichi Semba
2 . 発表標題 Coherence measurements of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong coupling regime
3 . 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, M. Bamba, and K. Semba
2 . 発表標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime
3 . 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Ashhab, F. Yoshihara, T. Fuse, N. Yamamoto, A. Lupascu, and K. Semba
2 . 発表標題 Speed limits for quantum gates with weakly anharmonic qubits
3 . 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Z. Ao, F. Yoshihara, T. Fuse, T. Aoki, K. Koshino, K. Semba
2 . 発表標題 Parameter Analysis Towards Deterministic Photon Down-conversion in Ultra-strong Coupling Regime
3 . 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2021 (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sahel Ashhab, Kouichi Semba, and Kazuki Koshino
2. 発表標題 Ground state of open circuit QED systems in the deep-strong coupling regime
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 布施 智子, 吉原 文樹, Sahel Ashhab, 角柳 孝輔, 齊藤 志郎, 仙場 浩一
2. 発表標題 磁束量子ビットLC 共振器深強結合回路のコヒーレンス測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 文樹, アシュハブ サヘル, 布施 智子, 馬場 基彰, 仙場 浩一
2. 発表標題 磁束量子ビット - LC共振器結合系の回路Hamiltonianにおけるゲージ変換
3. 学会等名 日本物理学会2021年春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 文樹, アシュハブ サヘル, 布施 智子, 馬場 基彰, 仙場 浩一
2. 発表標題 磁束量子ビット - LC共振器結合系の回路Hamiltonianにおける ゲージ変換
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 設楽智洋, 馬場基彰, 吉原文樹, 布施智子, 仙場浩一, 越野和樹
2. 発表標題 深強結合系を用いた精密測定的能力
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba
2. 発表標題 Time-domain measurements of an ultra-strongly coupled qubit-resonator circuit
3. 学会等名 American Physics Society (APS) March Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoko Fuse, Zhihao Xiao, Sahel Ashhab, Fumiki Yoshihara, Masahide Sasaki, Kouichi Semba, Masahiro Takeoka, and Jonathan P. Dowling
2. 発表標題 Fast Amplification and Rephasing of a Cat State in a Qubit-Oscillator System
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, and K. Semba
2. 発表標題 Derivation of the Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit using the circuit variables
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ziqiao Ao, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sunmi Kim, Sahel Ashhab, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, Tomohiro Shitara, Kazuki Koshino, Takao Aoki, Kouichi Semba
2. 発表標題 Selection rules of quantum transitions observed in superconducting flux qubit-resonator circuits in the ultra-strong coupling regime
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Kouichi Semba, and Kazuki Koshino
2. 発表標題 Variational analysis of the ground state of a circuit QED system in the deep-strong coupling regime coupled to an environment
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoko Fuse, Zihao Xiao, Sahel Ashhab, Fumiki Yoshihara, Masahide Sasaki, Kouichi Semba, Masahiro Takeoka, and Jonathan P. Dowling
2. 発表標題 Fast Amplification and Rephasing of an Entangled Cat States in a Qubit-Oscillator System
3. 学会等名 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumiki YOSHIHARA, Sahel ASHHAB, Tomoko FUSE, and Kouichi SEMBA
2. 発表標題 Cross-resonance-based readout scheme of a superconducting flux qubit
3. 学会等名 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ziqiao Ao, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sunmi Kim, Sahel Ashhab, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, Tomohiro Shitara, Kazuki Koshino, Takao Aoki, Kouichi Semba
2. 発表標題 Observation of forbidden transitions using superconducting flux qubit coplanar waveguide resonator circuit in ultra-strong coupling regime
3. 学会等名 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sahel Ashhab, Yuichiro Matsuzaki, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse and Kouichi Semba
2. 発表標題 Spectral signatures of the superradiant phase in a possible circuit-QED realization of the Dicke model
3. 学会等名 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 布施智子, Zhihao Xiao, Sahel Ashhab, 吉原文樹, 仙場浩一, 佐々木雅英, 武岡 正裕, Jonathan P. Dowling
2. 発表標題 量子ビットを用いた共振器中のシュレディンガー猫状態制御
3. 学会等名 応用物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 布施智子, Zhihao Xiao, Sahel Ashhab, 吉原文樹, 仙場浩一, 佐々木雅英, 武岡 正裕, Jonathan P. Dowling
2. 発表標題 量子ビットを用いた調和振動子中のシュレディンガー猫状態制御
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉原文樹, SaheI Ashhab, 布施智子, 仙場浩一
2. 発表標題 交差共鳴磁束バイアスによる超伝導磁束量子ビット測定法の理論検討
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関