

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03684

研究課題名(和文) 導波路量子電気力学系における可変境界条件の活用

研究課題名(英文) Application of variable boundary condition in waveguide quantum electrodynamics

研究代表者

越野 和樹 (Koshino, Kazuki)

東京医科歯科大学・教養部・准教授

研究者番号：90332311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：二準位原子が導波路に強く結合した系において導波路から共鳴光を入射すると、入射光が弱い際には原子は入射光を完全に反射する一方、入射光が強い際には原子は吸収飽和を起こすため入射光をほぼ完全に透過させる。換言すると、二準位原子は光強度に応じて異なる境界条件を与える。これを利用して、量子ゲート時間と量子ビット寿命に普遍的に存在するトレードオフの関係を打破するジョセフソン量子フィルタを提案した。本フィルタは原子が二準位系ではなく多準位系であっても問題なく作用する。また、本フィルタを用いて超伝導量子ビットに付随する二本の導波路(制御ライン、読み出しライン)を統一することも可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集積化された固体量子ビットを用いて量子計算を遂行するためには、個別アクセスのために個々の量子ビットに導波路を結合させ、そこから制御パルスを照射する。ゲート時間を短くするためには量子ビット-導波路結合は強いほうが良いが、量子ビットの寿命を長くするためには量子ビットの導波路への輻射緩和を防ぐ必要があり結合は弱いほうが良い。このように、ゲート時間と量子ビット寿命にはトレードオフの関係がある。本研究で提案したジョセフソン量子フィルタはこのトレードオフを解消するものであり、超伝導量子計算の実現可能性を拡げるものである。

研究成果の概要(英文)：When we apply a resonant light to an atom through a waveguide, the atom completely reflects the light if the light intensity is weak. In contrast, the atom completely transmits the light if the light intensity is strong. In other words, an atom changes the boundary condition of a waveguide depending on the intensity of the applied field. Using this property, we proposed a Josephson quantum filter, which resolves the tradeoff between the gate speed and the qubit lifetime, which is universal in superconducting quantum computation.

研究分野：量子光学

キーワード：導波路QED 超伝導量子計算 量子光学 量子制御

1. 研究開始当初の背景

鏡は電場に対して固定端境界条件を与える。よって、ファブリーペロー共振器の共鳴周波数を変えるためには鏡間距離を変える必要がある。一方、超伝導回路では、導波路を SQUID で終端し貫通磁束を電流によって調節することにより、導波路端での境界条件を固定端から開放端まで連続的かつ高速に、その場制御することができる [PRB 74, 224506 (2006)]。よって共振器の一端の境界条件を可変にしておく、共振器周波数を可変にできる。我々は以前の仕事で、共振器周波数に倍周波の変調を加えてパラメトリック振動子を実現し、90%超の高効率で超伝導量子ビットの単一試行読み出しに成功した [Nat. Commun. 5, 4480 (2014)]。

それでは、共振器ではなく導波路の境界条件を可変にしたときに何が起こるだろうか？半無限導波路中の固有モード関数は半無限に広がる定在波であり、境界条件を変化させると、固有モードの波長は不変だが、真空揺らぎの空間分布を平行移動できる。原子が固有モードの腹に位置する境界条件のもとでは、原子は導波路に強く結合して速く輻射緩和するのに対して、固有モードの節に位置する境界条件のもとでは、原子と導波路の結合を切り輻射緩和を止められる。つまり、原子と導波路との結合のオン・オフを遠隔操作することが可能となる。私は過去の研究 [New J. Phys. 14, 043005 (2012)] においてこの可能性を発見したものの、積極的活用はまだ踏み込めていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、量子光学理論の立場から、導波路の可変境界条件を活用した新たな量子現象を発掘し、量子デバイスへの応用を図る。境界条件の変え方として、導波路端を SQUID で終端する従来の方法に加え、原子が吸収飽和を起こすと透明になるという性質の活用も考える。

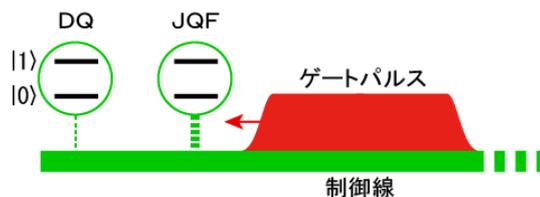
3. 研究の方法

本研究は理論研究であり、量子光学系の光学応答解析が主たる研究内容であるが、その具体的方法は次の通りである。①量子光学系の構成要素である、原子・共振器・導波路などの量子力学的ハミルトニアンを書き下す。②そのハミルトニアンからハイゼンベルグ方程式を導く。導波路の固有モードは波数の定まった状態であるが、フーリエ変換により実空間表示の導波路演算子を導入すると「入出力関係式」が得られる。これにより、導波路モードの連続的自由度を直接取り扱う必要が省け、原子・共振器からなる離散自由度系の開放系量子力学に帰着する。③導出したハイゼンベルグ方程式に対して、初期状態ベクトルで期待値をとり、各種物理量を数値的に計算する。出力光の性質は入出力関係式により計算可能である。また、超伝導人工原子を用いたマイクロ波量子光学系を用いて、理論検証を行った。

4. 研究成果

(1) ジョセフソン量子フィルタの提案

量子計算を遂行するためには量子ビットに個別にゲートをかける必要がある。特に、集積化された固体量子ビットを用いて量子計算を遂行するためには、個別アクセスのために個々の量子ビットに制御ラインと呼ばれる導波路を結合させ、そこから制御パルスを照射する。ゲート時間を短くするためには量子ビット-導波路結合は強いほうが良いが、量子ビットの寿命を長くするためには量子ビットの導波路への輻射緩和を防ぐ必要があり量子ビット-導波路結合は弱いほうが良い。このように、ゲート時間と量子ビット寿命にはトレードオフの関係がある。



ジョセフソン量子フィルタの概念図

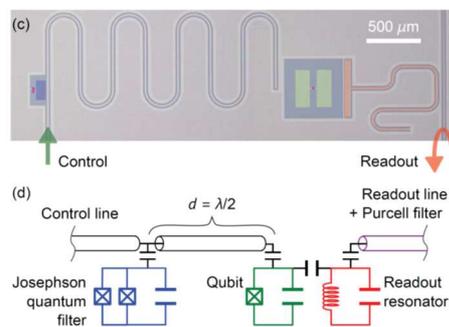
本研究では、このトレードオフを解消する「ジョセフソン量子フィルタ」を理論面から提案した。本提案では、制御の対象とするデータ量子ビット (DQ) に半無限の制御ラインを接続し、同じ制御ライン上で DQ の共鳴波長のおよそ半分的位置に、DQ と同じ周波数をもつ別の量子ビットであるジョセフソン量子フィルタ (JQF) を結合させる。ただし、JQF-制御ライン結合を DQ-制御ライン間結合よりも遥かに大きくしておく (典型的には、前者が数百メガヘルツ、後者が数千キロヘルツ)。すると DQ が励起状態、JQF が基底状態にあるとき、この状態は「反超放射状態」となり導波路へと輻射緩和しない。つまり、JQF の存在により DQ の寿命が無限大になる。一方で、DQ への制御パルスを照射すると、JQF はたちどころに飽和状態に達してパルスを透過させる。換言すると飽和効果により JQF 位置での境界条件が変わる。このためゲート時間は JQF の有無により変わらず、制御ラインに JQF を結合させることによってゲート時間と量子ビット寿命のトレードオフを打破できる。

(2) ジョセフソン量子フィルタにおける多準位効果

前項の研究(1)では量子ビットを理想的な二準位系として扱いジョセフソン量子フィルタを提案したが、超伝導量子計算で標準的に用いられるトランズモン量子ビットは、非調和性の比較的小さな非調和振動子であり、第二励起状態などより高いエネルギー準位の存在が無視できない。そこで本研究では、量子ビットおよびジョセフソン量子フィルタを非調和振動子として扱い、高エネルギー準位の影響を理論解析した。その結果、高エネルギー準位は(i)量子ビットの共鳴周波数にシフトをもたらす、(ii)ジョセフソン量子フィルタの吸収飽和をおこりにくくする、という負の効果を持つが、理想的な二準位系である場合からの忠実度低下は一万分の一のオーダーであり、量子ビットがトランズモンである場合にもジョセフソン量子フィルタが有効にはたらくことが明らかとなった。

(3) ジョセフソン量子フィルタの実験的検証

2つのトランズモン量子ビットを用いてジョセフソン量子フィルタの原理検証実験を行った。この実験において、制御の対象とするデータ量子ビットと導波路との結合は123キロヘルツ、ジョセフソン量子フィルタと導波路との結合は112メガヘルツであり、後者が前者よりも3桁大きい。またジョセフソン量子フィルタにSQUIDを組み込んで共鳴周波数のその場制御を可能としておく。ジョセフソン量子フィルタをデータ量子ビットに共鳴させたときに、データ量子ビットの寿命が1マイクロ秒から6マイクロ秒へと延びる一方、ゲート時間に相当するラビ振動周期は不変であることを確認し、トレードオフの解消を実証した。



実験系の顕微鏡写真(上)と等価回路図(下)

(4) 量子計算における制御ライン・読み出しラインの統一化

量子コンピュータの物理的実装には幾つかの候補があるが、その場制御可能な量子系である超伝導量子ビットの集積系がその最有力候補である。量子コンピュータでは個々の量子ビットにゲート操作および状態読み出しの2種類の操作を行う必要がある。超伝導量子計算では、個々の量子ビットにゲート操作および状態読み出し用の2種類の導波路を結合させマイクロ波照射によりこれらの操作を行う。

本研究では、測定・制御の対象とするデータ量子ビットが、大きな離調を有する読み出し共振器を介して、単一の導波路と結合している状況を考察し、その導波路からマイクロ波を照射することによって、データ量子ビットの制御および読み出しの両操作を高忠実度で行えるかについて理論解析を進めた。導波路の適切な位置にデータ量子ビットと同じ共鳴周波数を有するフィルター量子ビットを強く結合させることによって、データ量子ビットのパーセル崩壊(読み出し共振器を介した導波路への自然放出)を完全に抑制できることを理論的に示した。一方で導波路から強い制御用マイクロ波パルスが照射された場合には、フィルター量子ビットはすぐに吸収飽和をおこし、制御用マイクロ波パルスに対して透明になる。つまり、フィルター量子ビットを用いることによって、データ量子ビットのパーセル崩壊を抑制し長寿命性を保持しつつ、単一の導波路からデータ量子ビットの制御および読み出しの両操作を行うことが可能であることを理論的に示した。本提案により量子ビットあたりの導波路本数を削減することが可能となり、大規模化への助けになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Ilves J., Kono S., Sunada Y., Yamazaki S., Kim M., Koshino K., Nakamura Y.	4. 巻 6
2. 論文標題 On-demand generation and characterization of a microwave time-bin qubit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 34, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-020-0266-4	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 Kono S., Koshino K., Lachance-Quirion D., van Loo A. F., Tabuchi Y., Noguchi A., Nakamura Y.	4. 巻 11
2. 論文標題 Breaking the trade-off between fast control and long lifetime of a superconducting qubit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3683, 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17511-y	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 Masuda Shumpei, Koshino Kazuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Effects of higher levels of qubits on control of qubit protected by a Josephson quantum filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 013006, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abd809	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 -
1. 著者名 Koshino Kazuki, Kono Shingo, Nakamura Yasunobu	4. 巻 13
2. 論文標題 Protection of a Qubit via Subradiance: A Josephson Quantum Filter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014051, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.014051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koshino Kazuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Elliptical rotation of a bosonic oscillator in ultrastrong waveguide QED	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023060, 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023060	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 -

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, 1-19
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

1. 著者名 Koshino Kazuki, Shitara Tomohiro, Ao Ziqiao, Semba Kouichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Deterministic three-photon down-conversion by a passive ultrastrong cavity-QED system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013013, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.013013	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25件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 越野和樹
2. 発表標題 共振器・導波路QEDと量子デバイスへの応用
3. 学会等名 第9回つくば量子情報サロン (招待講演)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 越野和樹, 仙場浩一
2. 発表標題 超強結合共振器QED系を用いた決定論的三光子下方変換
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 越野和樹
2. 発表標題 超強結合導波路QED系における調和振動子の楕円運動
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 I. Iakoupov, K. Koshino
2. 発表標題 Saturable Purcell Filter for Circuit QED
3. 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 R. Asaoka, Y. Tokunaga, J. Gea-Banacloche, K. Koshino
2. 発表標題 Stimulated Emission of Superradiant Atoms in Waveguide QED
3. 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Z. Ao, F. Yoshihara, T. Fuse, T. Aoki, K. Koshino, K. Senba
2. 発表標題 Parameter Analysis Towards Deterministic Photon Down-conversion in Ultra-strong Coupling Regime
3. 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 T. Shitara, K. Koshino
2. 発表標題 Gauge-sensitive Selection Rule in the Ultrastrong Coupling Regime
3. 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 I. Iakoupov, K. Koshino
2. 発表標題 Saturable Purcell filter for circuit QED
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 T. Shitara, K. Koshino
2. 発表標題 Constructing resource theories of nonclassicality for continuous- and discrete-variable hybrid systems
3. 学会等名 APS March Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Kazuki Koshino and Kouichi Semba
2. 発表標題 Theory of deterministic three-photon down-conversion in ultrastrong cavity QED
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 T. Yamaji, S. Kagami, A. Yamaguchi, T. Satoh, K. Koshino, H. Goto, Z. Lin, Y. Nakamura, T. Yamamoto
2. 発表標題 Spectroscopic Observation of Crossover from Classical Duffing Oscillator to Kerr Parametric Oscillator
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 T. Shitara, M. Bamba, F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Semba, K. Koshino
2. 発表標題 Ground state of open circuit QED systems in the deep-strong coupling regime
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 越野和樹
2. 発表標題 共振器QEDと量子デバイスへの応用
3. 学会等名 Q-LEAP量子コンピュータセミナー～ハードウェア研究開発入門～(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Jesper Ilves, Shingo Kono, Yoshiki Sunada, Shota Yamazaki, Minkyu Kim, Kazuki Koshino, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Generation of a microwave time-bin qubit with a superconducting qubit
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Zhirong Lin, Shumpei Masuda, Kunihiro Inomata, Kazuki Koshino, Tsuyoshi Yamamoto, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Real-time detection of an itinerant microwave photon using dressed-state engineering
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, D. Lachance-Quirion, and Y. Nakamura
2. 発表標題 Breaking the trade-off between gate and relaxation times of a superconducting qubit with a Josephson quantum filter: Experiment
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Kazuki Koshino, Shingo Kono, Yutaka Tabuchi, Atsushi Noguchi, Dany Lachance-Quirion, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Theory of Josephson Quantum Filter
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Shumpei Masuda and Kazuki Koshino
2. 発表標題 Theoretical study of on-chip single microwave photon source based on adiabatic population transfer and shortcuts to adiabaticity
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Kouichi Semba, Kazuki Koshino
2. 発表標題 Ground state of a circuit QED system in the deep-strong coupling regime coupled to an environment
3. 学会等名 SQ20th (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 浅岡類, 徳永裕己, 金本理奈, 後藤隼人, 越野和樹, 青木隆朗
2. 発表標題 キャビティQEDに基づく受動的光子間ゲートの最適化
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 越野和樹, 河野信吾, 田淵豊, 野口篤史, D. Lachance-Quirion, 中村泰信
2. 発表標題 ジョセフソン量子フィルタの理論
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Jesper Ilves, 河野信吾, 砂田佳希, 山崎翔太, Minkyu Kim, 越野和樹, 中村泰信
2. 発表標題 超伝導回路を用いたマイクロ波タイムビン量子ビットの決定論的な生成と検証
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Z. Ao, F. Yoshihara, T. Fuse, S. Kim, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, T. Shitara, K. Koshino, T. Aoki, K. 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 ISNTT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 S. Masuda, A. Noguchi, H. Takahashi, K. Koshino, Y. Nakamura
2. 発表標題 Theoretical Study of a Cubic Transmon-transmon Coupled System
3. 学会等名 ISNTT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 T. Shitara, M. Bamba, F. Yoshihara, T. Fuse, K. Semba, K. 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 ISNTT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 越野 和樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 200
3. 書名 共振器量子電磁力学	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 非線形フィルタ	発明者 中村泰信, 河野信吾, 越野和樹	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、E128P05	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>反超放射で量子ビットを守る 量子ビット寿命の原理的限界を打破 http://www.tmd.ac.jp/archive-tmd/kouhou/20200128_2.pdf A filter for cleaner qubits https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-03/tmad-aff030520.php</p>
--

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
---------	---------