

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400417

研究課題名(和文) 一次元量子光学系を使った単一光子による決定論的量子操作の理論

研究課題名(英文) Theory of single-photon induced deterministic quantum-state operation in one-dimensional optical systems

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) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：等しい崩壊レートを有する型三準位系が一次的に伝播する光子を反射するとき、たった一つの光子が系の量子状態を決定論的にスイッチすることが知られている(インピーダンス整合系)。本研究では、超伝導人工原子とマイクロ波共振器とが結合している「導波路QED」系において、原子を外部マイクロ波でドライブすることによってできる「着衣状態」を用いてこの系を実装できることを理論的に示し、ドライブ条件を明らかにした。また、この系がマイクロ波光子検出器へと応用可能であることも示した。これらの理論的予言は実験的にも確認され、66%の量子効率を有する世界初のマイクロ波光子検出器を実現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：When a Lambda-type three-level system having identical radiative decay rates reflects a single photon propagating in one-dimensional waveguide, it is known that a resonant single photon deterministically switches the quantum state of the Lambda system (impedance-matched Lambda system). In this project, we theoretically showed that such a Lambda system can be implemented by driving a superconducting artificial atom coupled dispersively to a microwave resonator, and clarified the drive conditions. We also showed that such a Lambda system is applicable for a microwave single-photon detector. These predictions are confirmed experimentally: we realized a microwave single-photon detector whose quantum efficiency reaches 66%.

研究分野：量子光学(理論)

キーワード：量子状態操作 マイクロ波量子光学 量子情報 超伝導回路QED 着衣状態 量子ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

量子情報処理に必要となるスケーラブル量子回路の実現には、単一光子が量子情報の担体となって物質量子ビット間を飛び回り、多数の量子ビットをもつれさせる方法が有望である。そのためには、単一光子が 100% に近い高確率で物質と相互作用することが求められる。しかしながら、自由空間中の物質に単一光子を照射しても、光子が物質と相互作用する確率は極めて稀であり、ほとんどの場合相互作用なしに素通りしてしまう。この相互作用効率の低さの原因は、入射光子と物質の輻射パターンとの空間モードの不一致である。近年、実原子や量子ドットに共振器を組み合わせた「共振器 QED」および超伝導量子ビットにマイクロ波伝送線を組み合わせた「超伝導回路 QED」の双分野において、「一次元量子光学系」と称される系が構築されるようになった。この系では、共振器のパーセル効果などのために、物質からの輻射がほぼ完全に光ファイバーや伝送線などの一次元光子場に放出される。この一次元場を光子の入射ポートとして利用すれば、入射波と物質の輻射パターンとの空間モードが一致する。そのため、量子制御の観点からは回避すべき「光子が物質を素通りするイベント」を禁制にすることができ、単一の入射光子を決定論的に物質と相互作用させることが可能となる。

研究代表者は過去の理論研究において、二つの基底状態と一つの励起状態を持つ「型三準位系」が反射型配置で一次元光子と相互作用する場合の光学応答を解析した。その結果「系の二つの輻射緩和レートが等しい」「系が半無限の一次元光子場と反射型配置で相互作用する」という条件を同時に満たす系を実現できれば、単一光子により決定論的に系の量子状態をスイッチできることを見出した。この量子ダイナミクスは、量子メモリ・量子非破壊検出器・伝令つき単一光子といった量子デバイスへの応用が期待できる。

2. 研究の目的

上述のように「励起状態からの自然放出光子が完全に一次元場に射出される」「励起状態が輻射緩和レートの等しい二種類の緩和パスを持つ」という条件を同時に満たす系を実現できれば、単一光子により決定論的に物質の量子状態をスイッチすることができる。本研究の目標は、実験研究者との緊密な連携のもと、既存の実験技術の組み合わせにより、共振器 QED や超伝導回路 QED のセットアップでこれを実現するスキームを理論面から提案することである。現実系での実現に向けたハードルとなるのは、励起状態からの二種類の輻射崩壊レートを揃えることであると予想される。本理論研究では、輻射崩壊特性を「その場制御」できる多準位量子系の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では次のような手順を用いて、超伝導原子・共振器結合系のマイクロ波光学応答を理論解析する。まず、超伝導原子・共振器・一次元伝播マイクロ波光子場のハミルトニアンを書き下す。原子に照射するドライブ波は古典的に取り扱い、伝播光子場は離散化せず連続自由度を持つ場として扱う。次に、そのハミルトニアンからハイゼンベルグ方程式を導出する。ここで一次元伝播光子場については空間表示に移行し、入出力定式化を活用する。原子や共振器の緩和は、連続自由度を有する場との結合により自然に導入される。最後に、与えられた原子・共振器・入射マイクロ波光子の初期条件の下で、ハイゼンベルグ方程式を数値的に解く。もし入射マイクロ波が古典的(コヒーレント状態)であれば、これは入射場演算子の固有状態であるので、演算子を c 数として扱うことができる。また入射が単一光子のような非古典的状态であっても、その光子を古典パルスで置き換えて摂動的な計算を行うことにより光学応答を抽出する方法をとる [Koshino, PRL 98 223902 (2007)]。

4. 研究成果

(1) 着衣状態エンジニアリングの提唱

超伝導量子ビットを人工原子、伝送線路中のマイクロ波を電磁波モードとして用いる「回路量子電気力学系」において、着衣状態エンジニアリングの手法により、励起状態からの二つの崩壊レートが等しい「インピーダンス整合系」を実装する方法を理論的に提案した。考察の対象とするのは、ドライブされた超伝導量子ビット・共振器・半無限マイクロ波伝送線路の結合した系である。量子ビットと共振器との離調が大きい「分散結合領域」では、分散シフトのために共振器周波数が量子ビットの状態に依存する。よって、量子ビットを外場によりドライブしドライブ周波数での回転座標に移行すると、ドライブ周波数を適切に選ぶことにより、量子ビット・共振器結合系の最低四準位が「入れ子型」の準位構造をとる状況が生じる。それらを下から状態 1, 2, 3, 4 と呼ぶことにする。弱ドライブ極限では、四準位系の輻射崩壊は $4 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 2$ 方向におこる。一方、強ドライブ極限では、パリティ選択則により $4 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 1$ 方向におこる。つまり崩壊経路がドライブ印加によって逆転することがわかる。よって、ドライブ強度を適切に選択することにより、 $3 \rightarrow 1$ 遷移と $3 \rightarrow 2$ 遷移(または $4 \rightarrow 1$ 遷移と $4 \rightarrow 2$ 遷移)の崩壊レートが揃う状況が生じ、1, 2, 3 あるいは 1, 2, 4 の三準位を「インピーダンス整合系」として活用できる。半無限伝送線路から入射されるマイクロ波に対する系の光学応答を計算し、インピーダンス整合条件下においては、反射波振幅が完全に消滅し、入射波は一回の反射により完全に周波数下方変換を受ける

ことを示した。これらの結果は、入射された単一光子が決定論的に系のラマン遷移を誘起し、その量子状態をスイッチすることを示唆するものである。

(2) マイクロ波単一光子検出器の開発

前述の着衣状態エンジニアリングは、マイクロ波単一光子検出器へと応用可能である。考察の対象とするのは、ドライブされた超伝導量子ビットと共振器とが分散的に結合した系である。この系においてドライブ光の周波数およびパワーを適切な値に調整すると、量子ビット-共振器系の着衣状態により「インピーダンス整合系」と称される輻射崩壊レートの揃った系を構築することができる(モード)。この状態では、単一入射光子により超伝導量子ビットを決定論的に励起することが可能となる。一方、ドライブ光を切断すると、本系は超伝導量子ビット状態によって共鳴周波数の異なる共振器としてはたらくため(Iモード)、プローブ光を反射させてその位相シフトを測定することにより、超伝導量子ビット状態の量子非破壊測定が可能となる。これら二つのモード間の切り替えは、ドライブ光パワーを時間的に滑らかに変化させることによって、断熱的にスイッチすることが可能である。以上の動力学を、(1)ドライブ光を印加し、マイクロ波パルス中の光子数(0または1)を超伝導量子ビット(基底または第一励起状態)へと転写する「捕獲過程」、(2)ドライブ光を切断し、プローブ光を共振器へと照射して超伝導量子ビットの量子状態を読み出す「読み出し過程」、(3)再びドライブ光を印加して系を構成し、リセット光の照射により超伝導量子ビットを基底状態へと戻す「リセット過程」のように組み合わせることによって、時間ゲートモードで動作するマイクロ波光子検出器を構成することができる。本検出器には、信号パルスの時間波形によらずに90%超の高効率を達成できる、暗係数が無い、短時間でリセット可能であり高繰り返しレートを達成できる、といった特長がある。

マイクロ波単一光子検出は量子情報科学のみならず宇宙物理学においても重要な基盤技術であるが、光子エネルギーが可視光領域と比較して極めて小さいためにこれまで達成することができていなかった。本提案に基づく実証実験(arXiv:1601.05513)では、単一光子検出効率66%の達成に成功しており、世界初のマイクロ波単一光子検出技術として認識されるに至っている。検出エラーの主要因は量子ビット状態測定中の状態崩壊であるため、量子ビット寿命を改善することにより、単一光子検出効率を更に向上させることができる。

この光子検出器は「時間ゲートモード」の単一光子検出器であり、主として光子パルスが検出器に達する時刻を予め知っている状況下において効力を発揮する。その後、時間

ゲートを必要としない「連続測定モード」のマイクロ波光子検出器を理論面から開発した。具体的には、超伝導量子ビットに分散的に結合させる共振器を二つに増やし、片方を光子捕獲のために、もう一方を量子ビット状態の連続測定に利用する方法を提案した。本デバイスでは、現実的な量子ビット寿命のもとでも効率90%、バンド幅10MHz程度の達成が期待できる。

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7件)

K. Koshino, Z. Lin, K. Inomata, T. Yamamoto and Y. Nakamura, Dressed-state engineering for continuous detection of itinerant microwave photons, Physical Review A 93 (2016) 023824, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.93.023824>

K. Koshino, K. Inomata, Z. Lin, Y. Nakamura and T. Yamamoto, Theory of microwave single-photon detection using an impedance-matched Lambda system, Physical Review A 91 (2015) 043805, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.043805>

E. Iyoda, T. Kato, K. Koshino and T. Martin, Dephasing in single-electron generation due to environmental noise probed by Hong-Ou-Mandel interferometry, Physical Review B 89 (2014) 205318, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.205318>

K. Inomata, K. Koshino, Z. R. Lin, W. D. Oliver, J. S. Tsai, Y. Nakamura and T. Yamamoto, Microwave Down-Conversion with an Impedance-Matched Lambda System in Driven Circuit QED, Physical Review Letters 113 (2014) 063064, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.063064>

越野和樹, 猪股邦宏, 中村泰信, 山本剛, 単一光子による決定論的な量子状態スイッチング, 日本物理学会誌 第69巻第12号 (2014) 870, 査読有, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009896250>

Z. R. Lin, K. Inomata, K. Koshino, W. D. Oliver, Y. Nakamura, J. S. Tsai and T. Yamamoto, Josephson parametric phase-locked oscillator and its application to dispersive readout of superconducting qubits, Nature Communications 5 (2014) 4480, 査読有, <http://www.nature.com/ncomms/2014/140725/ncomms5480/abs/ncomms5480.html>

K. Koshino, K. Inomata, T. Yamamoto and Y. Nakamura, Implementation of an Impedance-Matched Lambda System by Dressed-State Engineering, Physical Review Letters 111 (2013) 153601, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.153601>

〔学会発表〕(計 15 件)

K.Koshino, Detection of microwave photon using an impedance-matched Lambda system, Interdisciplinary workshop on quantum device 2015, 2015 年 10 月 14 日, 国立情報学研究所(東京都・千代田区)

K.Koshino, K.Inomata, Z.R.Lin, T.Yamamoto and Y.Nakamura, Deterministic switching of superconducting qubit induced by single microwave photons, 15th international superconductive electronics conference, 2015 年 7 月 9 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)

K.Koshino, K.Inomata, Z.R.Lin, T.Yamamoto and Y.Nakamura, Deterministic switching of superconducting qubit induced by single microwave photons, 7th international workshop on solid-state quantum computing, 2015 年 7 月 2 日, 南京(中国)

伊與田英輝, 加藤岳生, 越野和樹, T. Martin, 単一電子生成における位相緩和の効果, 日本物理学会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

越野和樹, 猪股邦宏, Lin Zhirong, 中村泰信, 山本剛, 回路 QED におけるインピーダンス整合 Lambda 系の実現とその応用(理論), 量子情報技術研究会, 2014 年 11 月 18 日, 東北大学(宮城県・仙台市)

猪股邦宏, 越野和樹, Lin Zhirong, 蔡兆申, 中村泰信, 山本剛, 回路 QED におけるインピーダンス整合 Lambda 系の実現とその応用(実験), 量子情報技術研究会, 2014 年 11 月 18 日, 東北大学(宮城県・仙台市)

越野和樹, インピーダンス整合 Lambda 系によるマイクロ波光子検出, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2014 年 10 月 31 日, 東北大学(宮城県・仙台市)

越野和樹, Lin Zhirong, 猪股邦宏, 中村泰信, 山本剛, インピーダンス整合 Lambda 系を用いたマイクロ波単一光子検出の理論, 日本物理学会, 2014 年 9 月 10 日, 中部大学(愛知県・春日井市)

K.Koshino, Microwave quantum optics using superconducting qubit and semi-infinite waveguide, International Conference on Control of Self-Organizing Nonlinear Systems, 2014 年 8 月 27 日, ロストク(ドイツ)

K.Koshino, K.Inomata, Z.R.Lin, W.D.Oliver, J.S.Tsai, Y.Nakamura and T.Yamamoto, Deterministic switching of

superconducting qubit induced by individual microwave single photons, Condensed Matter in Paris 2014, 2014 年 8 月 25 日, パリ(フランス)

越野和樹, 松崎雄一郎, 増山雄太, 田淵豊, 石川豊史, 山崎歴舟, P.-M. Billangeon, 中村泰信, 強分散領域における超伝導回路 QED 系のマイクロ波光学応答理論, 日本物理学会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

越野和樹, 猪股邦宏, 山本剛, 中村泰信, Theory of implementation of an impedance-matched Lambda system in circuit QED, APS March Meeting 2014, 2014 年 3 月 4 日, コロラド(米国)

越野和樹, 猪股邦宏, 山本剛, 中村泰信, Realization of impedance-matched Lambda system in circuit quantum electrodynamics, ISNTT2013, 2013 年 11 月 27 日, NTT 物性基礎科学研究所(神奈川県・厚木市)

増山雄太, 木村純, 田淵豊, 石川豊史, 山崎歴舟, P.-M. Billangeon, 越野和樹, 中村泰信, 超伝導量子ビットの離散的 AC Stark シフトにおける非線形現象の観測, 日本物理学会, 2013 年 9 月 25 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

越野和樹, 猪股邦宏, 山本剛, 中村泰信, Microwave Response of an Impedance-Matched Lambda system in Circuit QED, CLEO-PR & OECC/PS 2013, 2013 年 7 月 2 日, 京都国際会議場(京都府・京都市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tmd.ac.jp/artsci/physics/ikuzak/index.html>

6. 研究組織

(1) 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

(3) 連携研究者

中村泰信 (NAKAMURA, Yasunobu)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号: 90524083

竹内 繁樹 (TAKEUCHI, Shigeki)

京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90524083