

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17731

研究課題名(和文)人工型三準位系を応用したマイクロ波単一光子検出

研究課題名(英文)Single microwave-photon detection based on an artificial Lambda-type three-level system

研究代表者

猪股 邦宏 (INOMATA, Kunihiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・客員研究員

研究者番号：50525772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：単一光子検出は、光とマイクロ波の両領域における量子光学実験において必須の技術である。しかしながら、マイクロ波量子のエネルギーは光のそれと比較して4～5桁小さいため、マイクロ波単一光子の高効率検出は極めて困難である。我々は、超伝導マイクロ波共振器と超伝導量子ビットを結合させた回路を用いることによって、導波路を伝搬するマイクロ波単一光子の高効率検出に成功した。マイクロ波単一光子検出効率として、 $66 \pm 6\%$ (伝播マイクロ波光子検出効率としては世界最高)、ダークカウント確率 $1.4 \pm 0.1\%$ 、光子検出レート1.3 MHzを達成した。

研究成果の概要(英文)：Single-photon detection is a requisite technique in quantum-optics experiments in both the optical and the microwave domains. However, the energy of microwave quanta are four to five orders of magnitude less than their optical counterpart, making the efficient detection of single microwave photons extremely challenging. We have succeeded in detecting a single microwave photon propagating through a waveguide by using a coupled system of a superconducting microwave resonator and a superconducting qubit. We attain a high single-photon detection efficiency of $66 \pm 6\%$ with a low dark-count probability of $1.4 \pm 0.1\%$ and a photon counting rate of 1.3 MHz.

研究分野：低温物理実験，マイクロ波量子光学

キーワード：単一マイクロ波光子検出 人工型原子 回路量子電磁力学 超伝導量子ビット マイクロ波共振器

1. 研究開始当初の背景

量子光学分野のみならず、量子暗号通信・微弱光通信・蛍光測定等の様々な分野において高性能な光子検出器に関するニーズが高まっており、光子を高効率で補足し検出することが求められている。これらの分野では、いわゆる通信波長帯 (1550 nm) の光子が用いられることが多い。この波長帯では、80~90 % を超える高効率で光子検出を可能とする超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) や超伝導転移端センサー (TES) 等の超伝導光子検出器、検出効率は低いが In-GaAs アバランシェフォトダイオード (APD) といった実用的な半導体光子検出器が存在する。これらの光子検出器はいずれもエネルギーギャップ (超伝導検出器: 数百 GHz, 半導体検出器: 数百 THz) を有しており、検出器に入射した通信波長帯の光子 (エネルギー: 数百 THz) は、超伝導中の準粒子もしくは半導体中の電子-正孔対を励起する。この励起によって発生する検出器内部の電圧もしくは抵抗スパイク、またはアバランシェ効果によって増幅された電流を観測することにより、光子を間接的に検出することが可能となる。

一方、回路量子電磁力学 (回路 QED) を主体とするマイクロ波量子光学の研究分野では、超伝導量子ビットの励起エネルギーに近いマイクロ波 (数 GHz ~ 数十 GHz) が使用されている。回路 QED 分野の発展とともに、マイクロ波光子検出のニーズが高まっているが、マイクロ波光子のエネルギーは通信波長帯の光子のそれと比較して実に 4~5 桁も小さく、その検出は困難を極めている。マイクロ波光子検出に関するいくつかの実験例や報告はあるものの [1-3]、その数は乏しく、実用的であるとはいえない。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らがこれまで理論的・実験的に実証してきたインピーダンス整合 Λ 型三準位系 (インピーダンス整合 Λ 系) [4,5] を応用することにより、マイクロ波単一光子の高効率検出技術を確認することに挑む。具体的には、以下の 2 課題について研究を行う。

- (1) インピーダンス整合 Λ 系に入射したマイクロ波光子は、周波数下方変換を受けると同時に量子ビットの状態を決定論的にスイッチさせることが明らかとなった [4,5]。 Λ 系への共鳴マイクロ波光子の入射によってスイッチした量子ビットの状態を、パラメトリック位相ロック発振器 (PPLO) を用いて読み出すことにより、マイクロ波単一光子の高効率検出を実証する。
- (2) インピーダンス整合 Λ 系に別な共振器を結合させ、この共振器を介して Λ 系を構成する量子ビットの状態を観測し続け

ることにより、 Λ 系に入射されたマイクロ波単一光子の実時間連続測定を実証する。

3. 研究の方法

本研究提案において、マイクロ波量子光学の実験の舞台となるのは、超伝導量子ビットと超伝導コプレー型マイクロ波共振器が結合した回路 QED 系である。

量子ビット - 共振器結合系の固有エネルギーは、基底状態ラダー $|g, n\rangle$ と励起状態ラダー $|e, n\rangle$ ($n=0, 1, 2, \dots$) によって記述できる。ここでは、単一光子レベルの微弱な共振器入力パルスに対する応答のみを取り扱うため、エネルギーラダーの最低四準位 ($n=0, 1$) のみが関与する [図 1.(a)]。適切な量子ビットの駆動マイクロ波周波数 ω_d ($\omega_{ge} - 2\chi < \omega_d < \omega_{ge}$) を選択することによって、 ω_d の回転座標系において $|g, 0\rangle < |e, 0\rangle < |g, 1\rangle < |e, 1\rangle$ とすることができる [図 1.(b)]。さらに、量子ビットの駆動マイクロ波パワー P_d は、その大きさによって状態 $|g, n\rangle$ と $|e, n\rangle$ のエネルギーを接近・結合させ、駆動マイクロ波照射下における系のハミルトニアン固有状態である着衣状態を形成する。結合系の着衣状態 $|m\rangle$ ($m=1, 2, 3, 4$) 間における二つの輻射崩壊レートは P_d によって制御可能となり、ここでは特に $\kappa_{41} = \kappa_{42}$ (κ_{ij} は $|i\rangle$ から $|j\rangle$ への輻射崩壊レート) となるよう P_d を調節することで、二つの輻射崩壊レートが等しいインピーダンス整合 Λ 系を構成する [4,5]。実際の実験では、適切な P_d と ω_d に選択された駆動マイクロ波パルスを結合系に照射することにより、パルス照射時のみ $|1\rangle, |2\rangle, |4\rangle$ の着衣状態によってインピーダンス整合 Λ 系を構成する [図 1.(b)]。駆動パルスと同時に Λ 系に共鳴光子パルス (平均光子数 ~ 0.1) をそれぞれ独立なポート

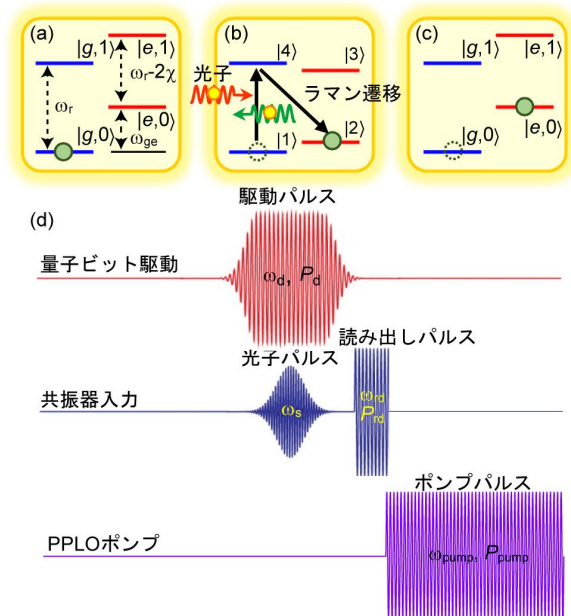


図1. 超伝導量子ビット-マイクロ波共振器結合系のエネルギー準位図と単一マイクロ波光子検出のためのパルスシーケンス

から同時に入力すると[図 1.(d)],マイクロ波光子は $|1\rangle \rightarrow |4\rangle \rightarrow |2\rangle$ のラマン遷移によって周波数下方変換され,同時に系の状態,具体的には量子ビットの状態を決定論的に励起させる[図 1.(b)].この量子ビットの励起状態 $(|e, 0\rangle)$ は,ジョセフソンパラメトリック増幅器を非線形領域で動作させることによって得られるパラメトリック位相ロック発振器(PPLO)[6]によって,単一試行で読み出される.PPLO 駆動のためのポンプマイクロ波は,共振器への読み出しパルス照射後,直ちに別のポートから入射される[図 1.(d)].このように,インピーダンス整合系に入射されたマイクロ波単一光子による量子ビットの励起を観測することによって,マイクロ波光子の検出が可能となる.

マイクロ波共振器が量子ビットと結合することによってインピーダンス整合系の実装を可能とする一方で,両者の結合は共振器を介した量子ビットの状態の分散読み出しをも可能にする.上述のように我々の検出器では,インピーダンス整合系における入射マイクロ波光子による決定論的なラマン遷移が量子ビットを励起し,その励起状態を分散的に読み出すことで光子検出を行っている.上述のセットアップでは,インピーダンス整合系の実装と分散読み出しを同時に行うことは困難であることから,マイクロ波単一光子入射のタイミングでインピーダンス整合系を実装し,量子ビット状態読み出しのタイミングで駆動パルスをOFF にする必要がある.従って我々の検出器は,マイクロ波単一光子の入射タイミングを予め把握しなければならないタイムゲート方式によって動作する.

検出器への光子の入射タイミングを予め把握しなくとも,光子を高効率で検出可能な手法が求められる.このような手法を実現するために,超伝導量子ビットにマイクロ波共振器を二つ結合させることにより,一方をインピーダンス整合系実装用,他方を量子ビットの分散読み出し用とすることで,系を実装した状態で量子ビットの分散読み出しをも可能とするデバイスの設計・作製を行った.このデバイスを用いることで,マイクロ波単一光子の実時間連続測定が可能となる.

4. 研究成果

(1) マイクロ波単一光子の高効率検出

実験では,はじめにマイクロ波光子検出器の動作点となるインピーダンス整合点を測定した.

図 1.(d)のパルスシーケンスにおいて,量子ビットの駆動パルスパワー P_d と光子パルスの周波数 ω_s (光子パルスの平均光子数は ~ 0.1 を保持)をスイープしながら,共振器から反射される光子パルスの反射係数 $|r|$ を測定した結果,図 2.(a)を得た. $(P_d, \omega_s/2\pi)=(-75.5$ dBm, 10.268 GHz)において $|r|$ にディップ($|r|$

< -25 dB)が観測され,ほぼ完全な反射波の消失を確認した.これは, $P_d = -75.5$ dBm の条件下においてインピーダンス整合が起り,系に共鳴する入射光子($\omega_s/2\pi = 10.268$ GHz が図 1.(b)の $\omega_{41}/2\pi$ に一致,ここで ω_{ij} は $|j\rangle$ から $|i\rangle$ への遷移エネルギーを示す)が決定論的なラマン遷移を受け周波数下方変換されたためである.図 2.(a)挿入図は測定範囲を上げた結果を示しており, $(P_d, \omega_s/2\pi)=(-74$ dBm, 10.228 GHz)においても $|r|$ にディップが観測された.これも同様にインピーダンス整合によるものである.ここでは, $P_d = -74$ dBm の条件下において入射光子の周波数 $\omega_s/2\pi = 10.228$ GHz と図 1.(b)の $\omega_{31}/2\pi$ の共鳴により,入射光子が $|1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |2\rangle$ のラマン遷移によって周波数下方変換された結果である.

インピーダンス整合点では,系に共鳴な入射マイクロ波光子がラマン遷移を受け周波数下方変換されるのと同時に,系の状態をスイッチさせる.具体的には,入射マイクロ波光子によって決定論的に量子ビットが励起されるのである.従って,インピーダンス整合点において光子パルス入射後,直ちに量子ビットの状態を読み出すことによってマイクロ波光子の検出となる.図 1.(d)のパルスシーケンスを用いてインピーダンス整合系を実装し,光子パルス入射直後に読み出しパルスと PPLO のポンプパルスを入射することによって,量子ビットの状態を読み出した.この一連のパルスシーケンスを 10^4 回繰り返し,光子パルスが光子を含む確率とマイクロ波光子によって決定論的に励起された量子ビットの励起確率よりマイクロ波光子検出効率 η を計算した[図 2.(b)].

図 2.(b)を見て分かるように,同図(a)のディップが観測されたポイントにおいて, η が最大となることが確認された.このことは,前述したように,インピーダンス整合点において量子ビットの状態がラマン遷移によって決定論的に励起されていることを実験的に示したものに他ならない.図 2.(c)は η が

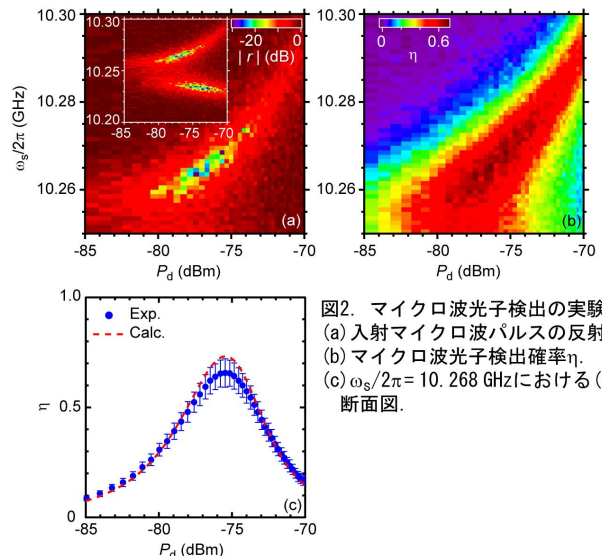


図2. マイクロ波光子検出の実験結果
(a) 入射マイクロ波パルスの反射係数 $|r|$.
(b) マイクロ波光子検出確率 η .
(c) $\omega_s/2\pi = 10.268$ GHzにおける(b)の断面図.

最大となる $\omega_s/2\pi = 10.268$ GHz における図 2.(b)の断面図である。これまでのところ $66 \pm 6\%$ の最大検出効率を達成した。光子検出効率は量子ビットの寿命($T_1 \sim 0.7$ μ s)によってリミットされているが、この寿命の改善によって検出効率は容易に 90 %を超えることも理論的に示した[7]。

(2) 検出器のダークカウント

マイクロ波単一光子検出器のダークカウントを実験によって詳細に測定した。我々の検出器においてダークカウントは、マイクロ波単一光子パルス決定論的ラマン遷移に依らない量子ビットの励起であり、その主な要因は(i)駆動パルスによる量子ビットの非断熱遷移、(ii)量子ビットの熱励起、の二つに分けることができる。(i)の確率は、駆動パルスの振幅 P_d と長さに依存し、本実験においては図 1.(d)に示すように駆動パルスの立ち上がりガウシアン型としても、有限な非断熱遷移確率を示した。(ii)の確率は、測定温度が一定という条件下においては一定となる。図 1.(d)のパルスシーケンスにおいて、光子パルス OFF 時の量子ビットの励起確率 $P(|e\rangle)$ を測定した。駆動パルスの長さ t_d は図 2 における実験と同様 $t_d=178$ ns (一定)である。この測定結果は、(i)と(ii)の確率の和を与え、図 1.(d)のパルスシーケンスにおいて、駆動パルスと光子パルスの両者を OFF とすると(ii)の確率のみを与え、その値は $0.8 \pm 0.1\%$ となった。最大検出効率を得られた $P_d = -75.5$ dBm [図 2.(c)参照]におけるダークカウントは、 $1.4 \pm 0.1\%$ であった。尚、図 2.(c)の測定結果からは、この値を差し引いている。

(3) 検出器のリセット

上述してきたように、我々のマイクロ波単一光子検出器では、共鳴入射マイクロ波光子が決定論的なラマン遷移を引き起こし、量子ビットの状態を励起させる。励起された量子ビットは、量子ビットのエネルギー緩和時間 T_1 に従って基底状態へ緩和する。しかしながら、量子ビットが基底状態へ緩和する前に次のマイクロ波光子が検出器へ入射された場合、量子ビットの励起準位が占有されているため決定論的なラマン遷移は起こらない。従って、 T_1 よりも短い間隔で連続的に入射されるマイクロ波光子を捕捉するためには、マイクロ波光子検出後、検出器をリセットすることが求められる。図 3.(a)に検出器リセットのためのパルスシーケンスを示す。ここでは、まず、量子ビット駆動ポートより π パルス照射し、量子ビットを強制的に励起させる。これにより、マイクロ波光子検出器が光子を検出した直後と同様な状態を準備する。次に、量子ビット駆動パルスの照射によって、インピーダンス整合 Δ 系を実装し、駆動パルスと同時に共振器入力ポートからリセットパルスを

入射する。リセットパルスの周波数 ω_{rst} は図 1.(b)の $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ 遷移に共鳴であり、このパルス照射によって $|2\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |1\rangle$ のラマン遷移を引き起こし、状態を $|1\rangle$ の基底状態に強制的にリセットさせる。リセットパルス照射後、量子ビット駆動パルスを OFF にし、量子ビットの励起状態(励起確率 $P(|e\rangle)$)を読み出し、励起確率が十分低ければリセットプロセスが機能したことになる。図 3.(b)は同図(a)のリセットパルスシーケンス後の量子ビットの励起確率 $P(|e\rangle)$ を量子ビット駆動パルスパワー P_{dr} とリセットパルス周波数 ω_{rst} に対してプロットしたものである。最適リセットポイント($P_{dr}, \omega_{rst}/2\pi$) = (-72.1 dBm, 10.162 GHz)において、最小値である $P(|e\rangle) = 1.7 \pm 0.2\%$ を得た。図 3.(a)において、リセットパルス OFF 時には $P(|e\rangle) = 49.0 \pm 1.0\%$ となることから、リセットパルスによる検出器リセットの有用性が示された。図 3.(a)のリセットパルスシーケンス(量子ビット駆動およびリセットパルス)の後に図 1.(d)のパルスシーケンスを実行し、マイクロ波単一光子検出実験を行ったところ、 $\eta = 67 \pm 6\%$ が得られた。この値は、図 2.(c)で得られた実験結果と一致している。このことは、リセットシーケンスはその後に続くマイクロ波光子検出効率に影響を与えないこと意味している。リセットシーケンスを含むマイクロ波光子の検出レートは、これまでのところ 1.3 MHz となっている。

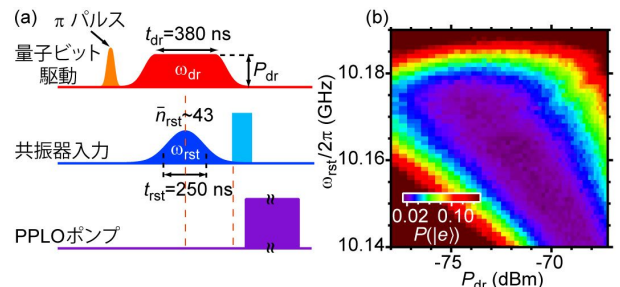


図3. マイクロ波光子検出器のリセット
(a) マイクロ波光子検出器リセットのためのパルスシーケンス
(b) マイクロ波光子検出器のリセット結果

(4) マイクロ波単一光子の実時間連続測定

マイクロ波単一光子の実時間連続測定を実現するためには、インピーダンス整合 Δ 系を実装するためのマイクロ波共振器の他に、量子ビットの状態を分散読み出しするためのマイクロ波共振器を結合させる必要がある。そうすることにより、インピーダンス整合 Δ 系の実装を維持しながら量子ビットの状態を連続モニタすることが可能となる。これは、すなわち、マイクロ波単一光子の入射タイミングを予め把握する必要がなく、タイムゲートオペレーション動作からの脱却が可能となる。我々は、超伝導量子ビットに二つのマイクロ波共振器を結合させることにより、マイクロ波単一光子検出の実時間連続測定が可能であることを理論的に示し[8]、現在、実験を行っている。

<引用文献>

- [1] Y.-F. Chen, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 217401 (2011).
[2] Y. Yin, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 107001 (2013).
[3] J. Wenner, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 210501 (2014).
[4] K. Koshino *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 153601 (2013).
[5] K. Inomata *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 063604 (2014).
[6] Z. R. Lin *et al.*, *Nat. Commun.* **5**, 4480 (2014).
[7] K. Koshino *et al.*, *Phys. Rev. A* **91**, 043805 (2015).
[8] K. Koshino *et al.*, *Phys. Rev. A* **93**, 023824 (2016).

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5件)*全て査読有り

- K. Koshino, Z. R. Lin, K. Inomata, T. Yamamoto, and Y. Nakamura,
“Dressed-state engineering for continuous detection of itinerant microwave photons”
Physical Review A **93**, 023824 (2016).
DOI:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.023824>
4
K. G. Fedorov, L. Zhong, S. Pogorzalek, P. Eder, M. Fischer, J. Goetz, E. Xie, F. Wulschner, K. Inomata, T. Yamamoto, Y. Nakamura, R. D. Candia, U. L. Heras, M. Sanz, E. Solano, E. P. Menzel, F. Deppe, A. Marx, and R. Gross,
“Displacement of Propagating Squeezed Microwave States”
Physical Review Letters **117**, 020502 (2016).
DOI:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.020502>
0502
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura,
“Single microwave-photon detector using an artificial Λ -type three-level system”
Nature Communications **7**, 12303 (2016).
DOI: 10.1038/ncomms12303
M. Bamba, K. Inomata, and Y. Nakamura,
“Superradiant Phase Transition in a Superconducting Circuit in Thermal Equilibrium”
Physical Review Letters **117**, 173601 (2016).
DOI:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.173601>
3601
K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y.

Nakamura, and T. Yamamoto,
“Theory of microwave single-photon detection using an impedance-matched Λ system”
Physical Review A **91**, 043805 (2015).
DOI:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.043805>
5

[学会発表](計18件:国内会議6件内招待講演2件,国際会議12件内招待講演8件)

[国内会議]

猪股邦宏, Lin Zhirong, 越野和樹, Oliver William, 蔡兆申, 山本剛, 中村泰信
“超伝導量子回路を用いたマイクロ波光子検出器”
電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会 2016/10/26 東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市.

猪股邦宏, Lin Zhirong, 越野和樹, Oliver William, 蔡兆申, 山本剛, 中村泰信
“人工 Λ 型原子を用いたマイクロ波単一光子検出” [招待講演]

第63回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム「cavity-QED, circuit-QEDの進展」~様々な系で何をどこまで出来るようになったのか~, 2016/3/22, 東京工业大学 大岡山キャンパス, 東京都目黒区.

猪股 邦宏

“超伝導回路を用いた量子コンピューティングとマイクロ波量子光学”

[招待講演]

先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会 平成27年度第6回研究会「極限量子技術の進展と応用」, 2016/3/4, 理化学研究所, 埼玉県和光市.

猪股邦宏, Lin Zhirong, 越野和樹, 山本剛, 中村泰信

“着衣状態エンジニアリングによるマイクロ波単一光子の検出(実験)”

日本物理学会2015年秋季大会 2015/9/18, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府吹田市. 越野和樹, 猪股邦宏, Lin Zhirong,

山本剛, 中村泰信

“着衣状態エンジニアリングによるマイクロ波単一光子の検出(理論)”

日本物理学会2015年秋季大会 2015/9/18, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府吹田市.

石川豊史, 河野信吾, 楠山幸一, 猪股邦宏, 増山雄太, 野口篤史, 田淵豊, 山崎歴舟, 宇佐美康二, 中村泰信

“超伝導量子ビットを用いたタイムビンモード伝搬光子の生成”

日本物理学会2015年秋季大会 2015/9/18, 関西大学千里山キャンパス, 大阪府吹田市.

[国際会議]

K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and

Y. Nakamura
“Single Microwave-Photon Detector”
[Invited talk]
29th International Symposium on Superconductivity (ISS 2016), 2016/12/14, Tokyo International Forum, Tokyo, Japan.
Z. R. Lin, K. Inomata, K. Koshino, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura
“Josephson parametric amplifier/oscillator and its application to quantum information processing” **[Invited talk]**
29th International Symposium on Superconductivity (ISS 2016), 2016/12/14, Tokyo International Forum, Tokyo, Japan.
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, Y. Nakamura
“Single Microwave-Photon Detector for Quantum Information” **[Invited talk]**
International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD 2016), 2016/11/15, Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan.
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, Y. Nakamura
“Single microwave-photon detector using an artificial Λ -type three-level system” **[Invited talk]**
High-Tc Superconductors (Plasma⁺2016), 2016/10/10, Nanjing University, Nanjing, China.
Z. R. Lin, K. Inomata, K. Koshino, J. S. Tsai, T. Yamamoto, M. Dykman, and Y. Nakamura
“Dynamics of flux-driven Josephson Parametric Oscillator” **[Invited talk]**
The 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (Plasma⁺2016), 2016/10/10, Nanjing University, Nanjing, China.
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, Y. Nakamura
“Single microwave-photon detection using an artificial Λ -type three-level atom” **[Invited talk]**
MICROPHOTON 2016, 2016/4/14, National Physical Laboratory, Teddington, UK.
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura
“Single microwave-photon detection using an impedance-matched Λ system” [Poster]
Dynamics in Artificial Quantum Systems, 2016/1/12, Tokyo, Japan.
K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura
“Itinerant microwave photon detection

using an impedance-matched Λ system”
[Oral]

International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2015/11/19, Atsugi, Japan.

K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura
“Itinerant microwave photon detection using an impedance-matched Λ system”
[Oral]

3rd Riken-NCTU Symposium on Physical and Chemical Science, 2015/11/14, Hsinchu, Taiwan.

K. Koshino, K. Inomata, Z. Lin, T. Yamamoto, and Y. Nakamura

“Theory of deterministic switching of a superconducting qubit induced by single microwave photons” **[Invited talk]**

15th International Superconductive Electronics Conference, 2015/7/9, Nagoya, Japan.

Z. Lin, K. Inomata, K. Koshino, Y. Nakamura, J. Tsai, and T. Yamamoto

“Josephson parametric phase-locked oscillator and its application to quantum information processing” [Oral]

15th International Superconductive Electronics Conference, 2015/7/9, Nagoya, Japan.

K. Inomata, Z. Lin, K. Koshino, J. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura

“Itinerant microwave photon detection in driven circuit QED” **[Invited Poster]**

15th International Superconductive Electronics Conference, 2015/7/7, Nagoya, Japan.

〔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〕

プレスリリース発表：2016年7月25日
「マイクロ波単一光子の高効率検出を実現 - マイクロ波光子を用いた量子通信, 量子情報処理へ応用 - 」

http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160725_1/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

猪股 邦宏 (INOMATA Kunihiro)

理化学研究所・創発物性科学研究センター
・ 研究員 研究者番号：50525772