

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7689391号
(P7689391)

(45)発行日 令和7年6月6日(2025.6.6)

(24)登録日 令和7年5月29日(2025.5.29)

(51)Int. Cl.

G 0 6 N 10/40

(2022.01)

F I

G 0 6 N 10/40

請求項の数 13 (全 18 頁)

(21)出願番号	特願2023-505189(P2023-505189)	(73)特許権者	503360115 国立研究開発法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(86)(22)出願日	令和4年1月26日(2022.1.26)	(74)代理人	100105924 弁理士 森下 賢樹
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/002831	(72)発明者	中村 泰信 東京都目黒区駒場4-6-1 国立大学法人東京大学内
(87)国際公開番号	W02022/190684	(72)発明者	砂田 佳希 東京都目黒区駒場4-6-1 国立大学法人東京大学内
(87)国際公開日	令和4年9月15日(2022.9.15)		
審査請求日	令和6年8月15日(2024.8.15)	審査官	千葉 久博
(31)優先権主張番号	特願2021-39384(P2021-39384)		
(32)優先日	令和3年3月11日(2021.3.11)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】量子もつれ生成装置、量子もつれ生成方法および量子コンピュータ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

nを2以上の整数としたとき、n個の量子ビット素子と、隣接する前記量子ビット素子の間に配置された結合共振器と、前記量子ビット素子の各々と互いにキャパシティブ結合された導波路と、を備え、前記結合共振器を用いて隣接する前記量子ビット素子の間に2量子ビットゲートを作用させることにより、当該隣接する前記量子ビット素子の間に量子もつれを生成し、前記量子ビット素子は、前記量子もつれを伝播マイクロ波光子として前記導波路に放出することにより、2次元クラスター状態を生成することを特徴とする量子もつれ生成装置。

【請求項2】

前記n個の量子ビット素子の各々は、3個の電極を有することを特徴とする請求項1に記載の量子もつれ生成装置。

【請求項3】

前記量子ビット素子は、前記量子もつれを伝播マイクロ波光子に転写し、当該伝播マイクロ波光子を前記導波路に放出する光子放出用量子ビットを含むことを特徴とする請求項1または2に記載の量子もつれ生成装置。

【請求項4】

前記量子もつれを伝播マイクロ波光子に転写し、当該伝播マイクロ波光子を前記導波路に放出する光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットを、前記量子ビット素子と独

立に備えることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の量子もつれ生成装置。

【請求項 5】

前記量子ビット素子の状態を読み出す読み出し共振器を備えることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれかに記載の量子もつれ生成装置。

【請求項 6】

前記 3 個の電極のうち 2 個は、前記導波路の方向から見たとき、同心円型の輪郭を持つ円環を半分に切った形状を持つことを特徴とする請求項 2 に記載の量子もつれ生成装置。

【請求項 7】

内部に空洞が貫通する導体キャビティを備え、

前記量子ビット素子と前記結合共振器とは、前記導体キャビティの空洞内に固定されることを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれかに記載の量子もつれ生成装置。

10

【請求項 8】

前記量子ビット素子は、

量子ビットを基底状態に初期化し、

基底状態を第 1 励起状態に半励起し、

第 1 励起状態を第 2 励起状態に励起し、基底状態を第 1 励起状態に励起し、第 2 励起状態から遷移を駆動させた後、伝播マイクロ波光子を共振器から導波路に放出させ、第 1 励起状態を第 2 励起状態に半励起することを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれかに記載の量子もつれ生成装置。

【請求項 9】

前記量子ビット素子は、超伝導量子ビット素子であることを特徴とする請求項 1 から 8 のいずれかに記載の量子もつれ生成装置。

20

【請求項 10】

請求項 1 に記載の量子もつれ生成装置を用いた量子もつれ生成方法であって、

前記量子もつれ生成装置が、量子ビットを基底状態に初期化するステップと、基底状態を第 1 励起状態に半励起するステップと、第 1 励起状態を第 2 励起状態に励起するステップと、基底状態を第 1 励起状態に励起するステップと、第 2 励起状態から遷移を駆動させた後、伝播マイクロ波光子を共振器から導波路に放出させるステップと、第 1 励起状態を第 2 励起状態に半励起するステップと、を実行することを特徴とする量子もつれ生成方法

30

【請求項 11】

請求項 1 から 9 のいずれかに記載の量子もつれ生成装置を備えることを特徴とする量子コンピュータ。

【請求項 12】

前記量子もつれ生成装置が生成した量子もつれ状態に対して測定を繰り返す、測定型量子計算を実行することを特徴とする請求項 11 に記載の量子コンピュータ。

【請求項 13】

前記量子もつれ生成装置が生成した量子もつれ状態を前記導波路から超伝導遅延線に伝播光子として一時格納した後、再度光子生成デバイスと相互作用させ、基底を備えた測定器を用いて、直前の測定結果をもとに次の測定基底を選択しながら測定を繰り返す、測定型量子計算を実行することを特徴とする請求項 11 に記載の量子コンピュータ。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子もつれ生成装置、量子もつれ生成方法および量子コンピュータに関する

【背景技術】

【0002】

量子コンピュータを実現する有力な方法の 1 つとして、測定型量子計算が提案されている（例えば、非特許文献 1、2）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】R. Raussendorf and H. J. Briegel "A One-Way Quantum Computer", P hys. Rev. Lett. 86, 5188,(2001)

【非特許文献2】R. Raussendorf, D.E. Browne, H. J. Briegel "Measurement-based qu antum computation with cluster states", Phys. Rev. A 68, 022312 (2003)

【非特許文献3】S. E. Economou, N. Lindner, and T. Rudolph "Optically Generated 2-Dimensional Photonic Cluster State from Coupled Quantum Dots", Phys. Rev. Lett . 105, 093601 (2010)

【非特許文献4】J. Ilves, S. Kono, Y. Sunada, S. Yamazaki, M. Kim, K. Koshino, Y . Nakamura "On-demand generation and characterization of a microwave time-bin qu bit", npj Quantum Information volume 6, Article number: 34 (2020)

【非特許文献5】J. M. Gambetta, A. A. Houck, Alexandre Blais, "Superconducting Q ubit with Purcell Protection and Tunable Coupling", Phys. Rev. Lett. 106, 030502 (2011)

【非特許文献6】M. Pechal, L. Huthmacher, C. Eichler, S. Zeytinoglu, A. A. Abdum alikov, Jr., S. Berger, A. Wallraff, and S. Filipp "Microwave-controlled generat ion of shaped single photons in circuit quantum electrodynamics", Physical Revie w X 4, 041010(2014)

【非特許文献7】P. Kurpiers, P. Magnard, T. Walter, B. Royer, M. Pechal, J. Hein soo, Y. Salathe, A. Akin, S. Storz, J.-C. Besse, S. Gasparinetti, A. Blais, A. W allraff, "Deterministic Quantum State Transfer and Generation of Remote Entangle ment using Microwave Photons", Nature 558, 264-267 (2018)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

測定型量子計算では、クラスター状態と呼ばれる大規模な量子もつれ状態を用意しておく必要がある。非特許文献3には、2つの結合した量子ドット対から2次元光子列のクラスタ状態を生成するアイデアが開示されている。非特許文献4には、超伝導回路量子電磁力学(circuit-QED)アーキテクチャによる、マイクロ波タイムビン量子ビットのオンデマンドな生成方法が開示されている。非特許文献5には、3個の電極を有する超伝導量子ビット素子が開示されている。これらの技術は、超伝導量子ビット素子を用いたマイクロ波光子列の2次元クラスター状態生成のための要素技術となっている。しかしながら、マイクロ波光子列の2次元クラスター状態を生成するための具体的な装置については、いまだ提案がされていない。

【0005】

本発明はこうした課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、マイクロ波光子列の2次元クラスター状態を生成する装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記課題を解決するために、本発明のある態様の量子もつれ生成装置は、 n を2以上の整数としたとき、 n 個の量子ビット素子と、隣接する量子ビット素子の間に配置された結合共振器と、量子ビット素子の各々と互いにキャパシティブ結合された導波路(例えば、同軸線やコプレーナ導波路など)と、を備える。結合共振器を用いて、隣接する量子ビット素子の間に2量子ビットゲートを作用させることにより、当該隣接する量子ビット素子の間に量子もつれを生成する。さらに、各量子ビットから、当該量子ビットとの間に量子もつれを有する伝播マイクロ波光子列を生成し、順次導波路に放出することにより、2次元クラスター状態を生成する。

【0007】

10

20

30

40

50

あるいは、結合共振器を用いずに、隣接する量子ビット素子が直接結合していてもよい。すなわち量子ビット同士が直接結合している場合であっても、本方式に必要な2量子ビットゲートを作用させることができる。

【0008】

n個の量子ビット素子の各々は、3個の電極を有してもよい。

【0009】

実施の形態の量子もつれ生成装置は、量子ビット素子の状態に依存して条件的に励起を生成し、その励起を伝播マイクロ波光子として導波路に放出する光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットを、量子ビット素子と独立に備えてもよい。

【0010】

実施の形態の量子もつれ生成装置は、量子ビット素子の状態を読み出す読み出し共振器を備えてもよい。

【0011】

3個の電極のうち2個は、導波路の方向から見たとき、同心円型の輪郭を持つ円環を半分に切った形状を持ってもよい。

【0012】

実施の形態の量子もつれ生成装置は、内部に空洞を持つ導体キャビティを備えてもよい。量子ビット素子と結合共振器とは、導体キャビティの空洞内に固定されてもよい。

【0013】

量子ビット素子は、量子ビットを基底状態に初期化し、基底状態を第1励起状態に半励起し、第1励起状態を第2励起状態に励起し、基底状態を第1励起状態に励起し、第2励起状態を光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットの励起に変換した後、伝播マイクロ波光子を光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットから導波路に放出させてもよい。

【0014】

量子ビット素子は、超伝導量子ビット素子であってもよい。

【0015】

本発明の別の態様は、前述の量子もつれ生成装置を用いて量子もつれを生成する方法である。この方法は、量子ビットを基底状態に初期化するステップと、基底状態を第1励起状態に半励起するステップと、第1励起状態を第2励起状態に励起するステップと、基底状態を第1励起状態に励起するステップと、第2励起状態を光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットの励起に変換した後、伝播マイクロ波光子を光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットから導波路に放出させるステップと、を備える。

【0016】

本発明のさらに別の態様は、前述の量子もつれ生成装置を備える量子コンピュータである。

【0017】

実施の形態の量子コンピュータは、量子もつれ生成装置が生成した量子もつれ状態に対して測定を繰り返す、測定型量子計算を実行してもよい。

【0018】

実施の形態の量子コンピュータは、量子もつれ生成装置が生成したクラスター状態を前記導波路から超伝導遅延線に伝播光子として一時格納した後、伝播光子を別の量子ビット素子で吸収し、もつれ生成用量子ビット素子との間に2量子ビットゲートを作用させ、基底変換を行った後に測定し、直前の測定結果をもとに次の測定基底を選択しながら測定を繰り返す、測定型量子計算を実行してもよい。

【0019】

なお、以上の構成要素の任意の組合せ、本発明の表現を装置、方法、システム、記録媒体、コンピュータプログラムなどの間で変換したものもまた、本発明の態様として有効である。

【発明の効果】

10

20

30

40

50

【0020】

本発明によれば、量子ビットの2次元クラスター状態を生成する装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】1次元クラスター状態を示す模式図である。

【図2】2次元クラスター状態を示す模式図である。

【図3】量子ビットと共振器とを結合したデバイスによる伝播マイクロ波光子の生成・放出を示す模式図である。

【図4】図3のデバイスを用いて伝播マイクロ波光子を生成・放出するときの状態遷移図である。

【図5】第1の実施の形態に係る量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する様子を示す模式図である。

【図6】第1の実施の形態に係る量子もつれ生成装置の透視図である。

【図7】図6の量子もつれ生成装置における超伝導量子ビット素子の平面図である。

【図8】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順のステップ1を示す図である。

【図9】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順のステップ2-1を示す図である。

【図10】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順のステップ2-3を示す図である。

【図11】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順のステップ2-4を示す図である。

【図12】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順のステップ2-5を示す図である。

【図13】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順において、ステップ(2-1)~(2-5)を、「所望の光子鎖長-1回」繰り返すことを示す図である。

【図14】図6の量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する手順を示すフローチャートである。

【図15】第2の実施の形態に係る量子もつれ生成装置の透視図である。

【図16】第4の実施の形態に係る量子コンピュータの透視図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、本発明を好適な実施の形態をもとに図面を参照しながら説明する。実施の形態は、発明を限定するものではなく例示である。実施の形態に記述されるすべての特徴やその組み合わせは、必ずしも発明の本質的なものであるとは限らない。各図面に示される同一または同等の構成要素、部材、処理には、同一の符号を付するものとし、適宜重複した説明は省略する。また、各図に示す各部の縮尺や形状は、説明を容易にするために便宜的に設定されており、特に言及がない限り限定的に解釈されるものではない。また、本明細書または請求項の中で「第1」、「第2」等の用語が用いられる場合、特に言及がない限りこの用語はいかなる順序や重要度を表すものでもなく、ある構成と他の構成とを区別するためのものである。また、各図面において実施の形態を説明する上で重要ではない部材の一部は省略して表示する。

【0023】

具体的な実施の形態を説明する前に、先ず基本となる知見を説明する。量子コンピュータは、量子力学的現象を利用することにより高速計算を実現するコンピュータであり、古典的コンピュータでは現実的な計算時間での求解が困難である問題の一部を効率よく解くことができる。量子コンピュータの実現方式の主流であるゲート方式は、多数の量子ビットを1個ずつ作製した上で、これらを組み合わせて計算するための量子ビット間配線を形

成し、量子操作を順に行いながら計算を実行するものである。ゲート方式は、標準的な量子計算方式として盛んに研究されてきた一方、量子ビットの数が増えるにつれ配線や制御が複雑となるため、大規模化が難しいという課題があった。

【0024】

これに対し、別の実現方式である「測定型量子計算」（「一方向量子計算」とも呼ばれる）は、最初に特定の量子もつれ状態（クラスター状態）にある大量の量子ビットを用意し、これらの量子ビットを個々に測定することで計算を行う。この点で測定型量子計算は、計算内容に応じて量子ビット間の相互作用（量子ゲート）を制御する必要があるゲート方式とは異なる。クラスター状態は任意の量子計算のパターンを重ね合わせた状態となっており、当該クラスター状態に対して適応的に測定を繰り返すことにより、任意の計算を実行することができる。測定型量子計算の原理である。測定型量子計算の利点は、最初に十分な量子ビット数で、適切な量子もつれ構造を持つクラスター状態さえ用意しておけば、後は比較的簡単な各量子ビットの測定により任意の量子計算を実現できる点にある。ここで「適切な量子もつれ構造を持つクラスター状態」とは、複数の入力を用いた任意の量子計算を実現できる汎用的な量子もつれのことを指しており、最も単純な例として「2次元クラスター状態」と呼ばれるものが知られている。測定型量子計算によれば、大規模な量子計算を比較的小規模なハードウェアで実行することができる。

10

【0025】

「量子ビット」（「Qubit」または「キュービット」とも呼ばれる）は、量子コンピュータにおける量子情報の最小単位である。古典的コンピュータにおけるビットは、0または1のいずれかの値のみを取る。すなわちこの場合の状態（古典的状态）は、2状態である。これに対し量子ビットは、これら2状態を量子力学的に重ね合わせた状態を取ることができる。

20

【0026】

「量子もつれ」とは、量子多体系において、量子力学でなければ説明がつかない、2個以上の量子ビット間の相関のことをいう。量子もつれは量子力学を応用した様々な情報処理技術（量子計測、量子通信、量子計算など）で利用されている。以下に述べるクラスター状態も、量子もつれの一つである。

【0027】

「クラスター状態」は、測定型量子計算で使われる量子もつれである。クラスター状態を図示する場合、量子ビットを丸で表し、量子ビット間の量子もつれを線で表すことも多い。クラスター状態を使ってどのような量子計算ができるかは、当該クラスター状態の構造で決まる。例えば、1本の鎖状のクラスター状態（1次元クラスター状態）は、1入力・1出力の計算のみを可能とする。これに対し、多入力・多出力の任意の量子計算を実行できるようにするためには、網目状につながった構造を持つ2次元クラスター状態が必要となる。図1に、1次元クラスター状態を模式的に示す。図2に、2次元クラスター状態を模式的に示す。

30

【0028】

量子力学は、通常、原子や電子のような微視的な物理系に適用される。しかし、例えばジョセフソン素子を含む超伝導回路などの電子デバイスは、巨視的な物理系でありながら量子力学的振る舞いを示す。「超伝導量子ビット素子」は、このような超伝導回路を量子ビットとして機能する素子として利用するものである。すなわち超伝導量子ビット素子は、人工的に作成された、超伝導電気回路上の量子力学的な物理系である。超伝導量子ビット素子は、集積化や素子特性の制御が比較的容易であることから、量子コンピュータを実現するための有力なキーデバイスとして期待される。なお超伝導量子ビット素子に限らず、量子ビットとして機能する人工的な素子を、以下「量子ビット素子」と呼ぶこともある。

40

【0029】

マイクロ波領域のエネルギーを持った光子は、「マイクロ波光子」と呼ばれる。マイクロ波の周波数は10GHzのオーダーであるため、電氣的に制御が可能である。またマイク

50

口波の波長は1 cmのオーダーであるため、導体キャビティや薄膜パターンを用いて様々な装置を設計することができる。一方でマイクロ波光子のエネルギーは極めて小さく、具体的には500ミリケルビン(mK)の温度に相当する。こうしたことから、マイクロ波光子の生成および検出は極低温下で行う必要がある。

【0030】

超伝導量子ビット素子をチップ上に集積化して実装することにより、巨視的な量子回路を形成できる。しかしながら、1つのチップ上に実装できる超伝導量子ビット素子の数には限界がある。そこで、マイクロ波光子の伝播を利用してチップ同士を量子的に接続することにより、量子ネットワークを形成し、超伝導量子ビット素子の総数を増やす手法が提案されている(例えば、非特許文献6、7)。量子ビット間で量子情報を運ぶマイクロ波光子を「伝播マイクロ波光子」と呼ぶこともある。

10

【0031】

図3を参照して、伝播マイクロ波光子の生成・放出過程を説明する。図3は、デバイス1を導波路4に結合した系を示す。デバイス1は、量子ビット2と共振器3とをキャパシティブ結合して構成される。以下、デバイス1を用いて伝播マイクロ波光子5を生成し、生成された伝播マイクロ波光子5を、共振器3にキャパシティブ結合された導波路4(同軸線等)に放出する過程を説明する。

【0032】

最初に量子ビット2を目的の量子状態に設定する。次に量子ビット2にマイクロ波を照射することにより、量子ビット2が持つ量子状態を共振器3に転写する。その結果、共振器3は、量子ビット2の量子状態に対応する光子状態を持つ。最後に共振器3の光子状態が導波路4に自然放出することにより、伝播マイクロ波光子5のパルスが生成される。

20

【0033】

図4は、図3のデバイスを用いて伝播マイクロ波光子を生成・放出するときの状態遷移図である。以下、図4を参照して、伝播マイクロ波光子のパルスを1個生成する手順を説明する。この例では量子ビットは、基底状態 $|g\rangle$ 、第1励起状態 $|e\rangle$ 、第2励起状態 $|f\rangle$ の3準位系である。また共振器内には、光子が0個の真空状態 $|0\rangle$ 、光子が1個の1光子状態 $|1\rangle$ の2つの量子状態があるものとする。以下、ケット $| \rangle$ 内の左側の文字は量子ビットの状態、右側の文字は共振器内の光子の個数を示すものとする。例えば $|e0\rangle$ は、量子ビットが第1励起状態にあり、共振器内の光子数が0であることを示す。

30

【0034】

この例では、 $|g0\rangle$ を基準としたときの系の各状態のエネルギーに相当する周波数は以下の通りである。

$$|g0\rangle : 0 \text{ GHz}$$

$$|e0\rangle : 8.5 \text{ GHz}$$

$$|g1\rangle : 10.6 \text{ GHz}$$

$$|f0\rangle : 16.6 \text{ GHz}$$

【0035】

伝播マイクロ波光子は、以下の5つのステップにより生成する。

(ステップi) 量子ビットを基底状態 $|g\rangle$ に初期化する。

40

(ステップii) 量子ビットを目的の状態 $|g\rangle + |e\rangle$ に設定する。

(ステップiii) 量子ビットに第2励起状態 $|f\rangle$ と第1励起状態 $|e\rangle$ とのエネルギー差に相当する周波数(16.6 GHz - 8.5 GHz = 8.1 GHz)のマイクロ波を照射することにより、第1励起状態 $|e\rangle$ を第2励起状態 $|f\rangle$ に励起する。

(ステップiv) 状態 $|f0\rangle$ と状態 $|g1\rangle$ とのエネルギー差に相当する周波数(16.6 GHz - 10.6 GHz = 6.0 GHz)の駆動マイクロ波を照射することにより、状態 $|f0\rangle$ から $|g1\rangle$ への遷移を駆動する。これにより量子ビットが第2励起状態 $|f\rangle$ にある場合に条件的に共振器が励起され、量子ビットの状態 $|g\rangle + |e\rangle$ が共振器の量子状態 $|0\rangle + |1\rangle$ に転写される。

(ステップv) 共振器から導波路への自然放出により、伝播マイクロ波光子のパルス |

50

$0 > + | 1 >$ が生成される。系の状態は $| g 0 >$ に戻る。

なお本明細書では、上記の通り、デバイス全体の量子状態を表現するときは $| f 0 >$ 、 $| g 1 >$ 等の表記を使用し、量子ビットのみに着目する場合は $| f >$ 、 $| g >$ 等の表記を使用する（以下同様）。

【 0 0 3 6 】

以上の手順は、共振器の代わりに光子放出用量子ビットを持つデバイスでも実行できる。この場合、共振器の真空状態と1光子状態にはそれぞれ光子放出用量子ビットの基底状態と第1励起状態が対応する。

【 0 0 3 7 】

後述するように、同様の手順を踏むことにより、伝播マイクロ波光子列が鎖状にもつれ合った状態を生成することもできる。以下で説明する実施の形態において、伝播マイクロ波光子は、クラスター状態の生成において重要な役割を果たす。

【 0 0 3 8 】

[第1の実施の形態]

図5に、第1の実施の形態に係る量子もつれ生成装置を用いてクラスター状態を生成する様子を模式的に示す。本装置では、光子放出用共振器の代わりに光子放出用量子ビットを用いる。この量子もつれ生成装置は、2個のもつれ生成用量子ビット6 aおよび6 bと、もつれ生成用量子ビット6 aおよび6 bにそれぞれ結合した2個の光子放出用量子ビット7 aおよび7 bと、光子放出用量子ビット7 aおよび7 bに結合されたマイクロ波導波路8 aおよび8 bと、を備える。もつれ生成用量子ビット6 a、光子放出用量子ビット7 aおよびマイクロ波導波路8 aからなる系を第1列、もつれ生成用量子ビット6 b、光子放出用量子ビット7 bおよびマイクロ波導波路8 bからなる系を第2列と呼ぶ。隣接する2つのもつれ生成用量子ビット6 aおよび6 bの間には、2量子ビットゲートを作用させることができる。

【 0 0 3 9 】

2つのもつれ生成用量子ビット6 aおよび6 bの間の2量子ビットゲートは、第1列と第2列との間に量子もつれを生成する。上で述べたように、もつれ生成用量子ビットの状態に依存して条件的に光子放出用量子ビット7 aおよび7 bを励起することができる。その後、光子放出用量子ビットの励起がマイクロ波導波路8 aおよび8 bに自然放出されることにより、もつれ生成用量子ビットとの間に量子もつれを有する伝播マイクロ波光子を次々と生成できる。伝播マイクロ波光子を生成するたびに毎回もつれ生成用量子ビットの間に2量子ビットゲートを作用させることで、2次元クラスター状態が生成される。

【 0 0 4 0 】

図6に、第1の実施の形態に係る量子もつれ生成装置10を模式的に示す。量子もつれ生成装置10は、超伝導量子ビット素子20 aおよび20 bと、結合共振器30と、読み出し共振器40 aおよび40 bと、導波路50 aおよび50 bと、読み出し線60 aおよび60 bと、導体キャパシティ80と、を備える。超伝導量子ビット素子20 aおよび20 bはそれぞれ、もつれ生成用量子ビットと、光子放出用量子ビットと、をそなえる。すなわちこの量子もつれ生成装置10は、図5のもつれ生成用量子ビット6 aおよび光子放出用量子ビット7 aを、超伝導量子ビット素子20 aに統合した形で実装している。同様に、もつれ生成用量子ビット6 bおよび光子放出用量子ビット7 bを、超伝導量子ビット素子20 bに統合した形で実装されている。

【 0 0 4 1 】

読み出し共振器40 a、超伝導量子ビット素子20 a、結合共振器30、超伝導量子ビット素子20 b、読み出し共振器40 bは、図6において左から順に、シリコン基板70上に鎖状に配置される。読み出し共振器40 a、超伝導量子ビット素子20 a、結合共振器30、超伝導量子ビット素子20 b、読み出し共振器40 bは、例えばニオブ薄膜のドライエッチングによって作成される。

【 0 0 4 2 】

超伝導量子ビット素子20 aと結合共振器30とは、互いにキャパシティブ結合される

。同様に、超伝導量子ビット素子 2 0 b と結合共振器 3 0 とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 4 3 】

超伝導量子ビット素子 2 0 a と読み出し共振器 4 0 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 0 b と読み出し共振器 4 0 b とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 4 4 】

超伝導量子ビット素子 2 0 a と導波路 5 0 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 0 b と導波路 5 0 b とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 4 5 】

読み出し共振器 4 0 a と読み出し線 6 0 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、読み出し共振器 4 0 b と読み出し線 6 0 b とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 4 6 】

導体キャピティ 8 0 は、内部に円柱状の空洞を持つアルミ製のブロックである。導体キャピティ 8 0 の空洞内には、シリコン基板 7 0 が固定される。導体キャピティ 8 0 は、読み出し共振器 4 0 a の真上、超伝導量子ビット素子 2 0 a の真上、超伝導量子ビット素子 2 0 b の真上、読み出し共振器 4 0 b の真上に相当する位置にそれぞれ貫通孔が設けられる。これらの貫通孔を通して、読み出し線 6 0 a、導波路 5 0 a、導波路 5 0 b、読み出し線 6 0 b となる導波路がそれぞれ挿入される。これにより、導体キャピティ 8 0 が外導体を形成し、結合共振器 3 0、読み出し共振器 4 0 a および 4 0 b が内導体を形成する。その結果、量子もつれ生成装置 1 0 は同軸線共振器の構造を持つ。同軸線共振器は、コプレーナ線路等を用いて作成される 2 次元共振器と比べてモード体積が大きいいため、内部損失が小さいというメリットがある。さらに同軸線共振器は構造がシンプルであるため、低コストで容易に作成することができる。

【 0 0 4 7 】

読み出し共振器 4 0 a および 4 0 b は、例えばニオブ薄膜のドライエッチングによって作成された細長い超伝導薄膜線で形成される。読み出し共振器 4 0 a および 4 0 b は、量子もつれ生成装置 1 0 のキャリブレーションや、もつれ生成用量子ビットの状態を読み出すために用いられるものであり、実際のマイクロ波光子列の生成には関与しない。従って、本実施の形態において、必須の構成ではない点に注意する。

【 0 0 4 8 】

図 7 に、図 6 の量子もつれ生成装置 1 における超伝導量子ビット素子の一例として、3 つの電極を用いて構成された超伝導量子ビット素子 2 0 a の平面図を例示する。超伝導量子ビット素子 2 0 a は、第 1 の電極 1 0 1 と、第 2 の電極 1 0 2 と、第 3 の電極 1 0 3 と、を備える。第 1 の電極 1 0 1 と、第 2 の電極 1 0 2 とは、ともに同心円型の輪郭を持つ円環を半分にした形状を持つ。第 3 の電極 1 0 3 は、円形の形状を持つ。第 1 の電極 1 0 1 と第 2 の電極 1 0 2 とは、間に第 3 の電極 1 0 3 を挟んで、互いに向き合う形で配置される。第 1 の電極 1 0 1 と第 3 の電極 1 0 3 とは、ジョセフソン接合 J 1 により接合される。同様に、第 2 の電極 1 0 2 と第 3 の電極 1 0 3 とは、ジョセフソン接合 J 2 により接合される。

【 0 0 4 9 】

超伝導量子ビット素子 2 0 a は、第 1 の電極 1 0 1、第 2 の電極 1 0 2 および第 3 の電極 1 0 3 によって生成される電磁場の振動モードによって、もつれ生成用量子ビットとしても、光子放出用量子ビットとしても機能することができる。例えば、第 1 の電極 1 0 1 に正電位、第 2 の電極 1 0 2 にゼロ電位、第 3 の電極 1 0 3 に負電位をそれぞれ与えたとき、生成される電磁場のモードは、隣接する超伝導量子ビットと強く結合する。従ってこの場合は、超伝導量子ビット素子 2 0 a は、もつれ生成用量子ビットとして機能する。一方、例えば、第 1 の電極 1 0 1 に正電位、第 2 の電極 1 0 2 に負電位、第 3 の電極 1 0 3

10

20

30

40

50

に正電位をそれぞれ与えたとき、生成される電磁場のモードは、本実施形態において導波路として用いる同軸線と強く結合する。従ってこの場合は、超伝導量子ビット素子 20a は、光子放出用量子ビットとして機能する。

【0050】

従来の超伝導量子ビット、例えばトランズモン量子ビットは、1個のジョセフソン接合と1個のキャパシタとを並列に接続した回路によって構成される。この場合、電極は2個（すなわち1個のキャパシタ）である。この超伝導量子ビットは、本実施の形態と異なり、もつれ生成用量子ビットと光子放出用量子ビットの両方の機能を実現することはできない。この点で本実施の形態は、従来の超伝導量子ビットに対して、顕著な差異を持つ。

【0051】

超伝導量子ビット素子 20b の構成と動作は、前述の超伝導量子ビット素子 20a と同じであるので、詳しい説明は省略する。

【0052】

以下、図8から図13を参照して、量子もつれ生成装置1を用いて2次元クラスター状態を生成する手順を説明する。記号は、図4のものを適用する。2次元クラスター状態は、以下のステップにより生成する。

(ステップ1) 量子ビットを $|g\rangle$ に初期化する(図8)。

(ステップ2) 以下のステップ(2-1)~(2-5)を、「所望の光子鎖長-1回」繰り返す(図13)。

(ステップ2-1) $|g\rangle$ を $|e\rangle$ に半励起する(図9)。

(ステップ2-2) 隣り合う2量子ビット間に controlled-Zゲートを作用させる。

(ステップ2-3) $|e\rangle$ を $|f\rangle$ に励起する(図10)。

(ステップ2-4) $|g\rangle$ を $|e\rangle$ に励起する(図11)。

(ステップ2-5) $|f_0\rangle$ $|g_1\rangle$ 遷移を駆動し、伝播マイクロ波光子を放出する(図12)。

(ステップ3) $|g\rangle$ を $|e\rangle$ に半励起する。

(ステップ4) 隣り合う2量子ビット間に controlled-Zゲートを作用させる。

(ステップ5) $|e\rangle$ を $|f\rangle$ に励起する。

(ステップ6) $|f_0\rangle$ $|g_1\rangle$ 遷移を駆動し、伝播マイクロ波光子を放出する。

【0053】

図14に、上記のクラスター状態の生成手順をフローチャートで示す。

【0054】

以上の手順により、任意の長さのマイクロ波光子列2列からなる2次元クラスター状態を生成することができる。

【0055】

以上説明した実施の形態では、量子もつれ生成装置は、導体キャビティを備えた。しかしこれに限られず、超伝導量子ビットおよびマイクロ波共振器を外界から電磁的に隔離できるものであれば、任意の好適な筐体であってよい。例えば、同軸線共振器の代わりにコプレーナ共振器、同軸線の代わりにコプレーナ導波路を採用すれば、導体キャビティを用いない実装が可能である。

【0056】

以上説明した実施の形態では、量子もつれ生成用量子ビットと光子放出用量子ビットとは、1つの超伝導量子ビット素子に統合されていた。しかしこれに限られず、量子もつれ生成用量子ビットとは独立に光子放出用共振器あるいは光子放出用量子ビットが設けられていてもよい。

【0057】

本実施の形態によれば、量子ビットの2次元クラスター状態を生成する装置を実現することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 8 】

[第 2 の実施の形態]

図 1 5 に、第 2 の実施の形態に係る量子もつれ生成装置 1 1 を模式的に示す。量子もつれ生成装置 1 1 は、超伝導量子ビット素子 2 1 a、2 1 b および 2 1 c と、結合共振器 3 1 a および 3 1 b と、読み出し共振器 4 1 a、4 1 b および 4 1 c と、導波路 5 1 a、5 1 b および 5 1 c と、読み出し線 6 1 a、6 1 b および 6 1 c と、導体キャパシタ 8 1 と、を備える（図の煩雑を避けるため、読み出し線 6 1 b および 6 1 c は図示を省略した）。すなわち量子もつれ生成装置 1 1 は、図 6 の量子もつれ生成装置 1 0 の構成に追加して、超伝導量子ビット素子 2 1 c、結合共振器 3 1 b、読み出し共振器 4 1 c、導波路 5 1 c および読み出し線 6 1 c と、を備える。

10

【 0 0 5 9 】

超伝導量子ビット素子 2 1 a と結合共振器 3 1 a とは、互いにキャパシティブ結合される。超伝導量子ビット素子 2 1 b は、結合共振器 3 1 a および結合共振器 3 1 b とキャパシティブ結合される。超伝導量子ビット素子 2 1 c と結合共振器 3 1 b とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 6 0 】

超伝導量子ビット素子 2 1 a と読み出し共振器 4 1 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 1 b と読み出し共振器 4 1 b とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 1 c と読み出し共振器 4 1 c とは、互いにキャパシティブ結合される。

20

【 0 0 6 1 】

超伝導量子ビット素子 2 1 a と導波路 5 1 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 1 b と導波路 5 1 b とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、超伝導量子ビット素子 2 1 c と導波路 5 1 c とは、互いにキャパシティブ結合される。

【 0 0 6 2 】

読み出し共振器 4 1 a と読み出し線 6 1 a とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、読み出し共振器 4 1 b と読み出し線 6 1 b とは、互いにキャパシティブ結合される。同様に、読み出し共振器 4 1 c と読み出し線 6 1 c とは、互いにキャパシティブ結合される。

30

【 0 0 6 3 】

隣接する超伝導量子ビット素子 2 1 a と超伝導量子ビット素子 2 1 b との間には、2 量子ビットゲートを作用させることができる。同様に、隣接する超伝導量子ビット素子 2 1 b と超伝導量子ビット素子 2 1 c との間には、2 量子ビットゲートを作用させることができる。

【 0 0 6 4 】

クラスター状態生成の詳細な手順は第 1 の実施の形態の場合と同じであるので、説明を省略する。

【 0 0 6 5 】

図 6 の量子もつれ生成装置 1 0 が 2 列の伝播マイクロ波光子からなる 2 次元クラスター状態を生成したのに対し、量子もつれ生成装置 1 1 は 3 列の伝播マイクロ波光子からなる 2 次元クラスター状態を生成する。すなわち、本実施の形態によれば、より大規模な 2 次元クラスター状態を生成することができる。

40

【 0 0 6 6 】

[第 3 の実施の形態]

第 3 の実施の形態は、量子もつれ生成方法である。この方法は、前述の量子もつれ生成装置を用いて量子もつれ状態を生成する。この方法は、量子ビットを基底状態に初期化する第 1 のステップと、基底状態を第 1 励起状態に半励起する第 2 のステップと、第 1 励起状態を第 2 励起状態に励起する第 3 のステップと、基底状態を第 1 励起状態に励起する第 4 のステップと、第 2 励起状態から遷移を駆動させた後、伝播マイクロ波光子を共振器か

50

ら導波路に放出させる第5のステップと、を備える。本実施の形態によれば、量子もつれ生成装置を用いて伝播マイクロ波光子の2次元クラスター状態を生成することができる。

【0067】

[第4の実施の形態]

第4の実施の形態は、量子コンピュータである。この量子コンピュータは、前述の量子もつれ生成装置を備える。特にこの量子コンピュータは、前述の量子もつれ生成装置が生成した量子もつれ状態(クラスター状態)に対して測定を繰り返す、測定型量子計算を実行してもよい。本実施の形態によれば、大規模な量子計算を比較的小規模なハードウェアで実行可能な量子コンピュータを実現することができる。

【0068】

図16に、第4の実施の形態に係る量子コンピュータ12を模式的に示す。量子コンピュータ12は、超伝導量子ビット素子22aと、超伝導量子ビット素子22bと、結合共振器32と、読み出し共振器42aと、読み出し共振器42bと、超伝導遅延線52と、を備える。超伝導量子ビット素子22aは、光子吸収・基底変換用量子ビット素子として機能する。超伝導量子ビット素子22bは、もつれ生成・光子送出用量子ビット素子として機能する。結合共振器32は、離れた時刻に放出された伝搬光子の間に量子もつれを生成するための2量子ビットゲートを媒介する結合共振器として機能する。読み出し共振器42aは、基底変換用量子ビットの読み出し共振器として機能する。読み出し共振器42bは、光子送出用量子ビットの読み出し共振器として機能する。

【0069】

量子コンピュータ12は、例えば以下のプロセスで測定型量子計算を実行してもよい。すなわち量子コンピュータ12は、超伝導量子ビット素子22bが生成した量子もつれ状態(クラスター状態)を、超伝導遅延線52に伝播光子として一時格納した後、当該伝播光子を超伝導量子ビット素子22aで吸収し、基底変換を行った後に測定し、直前の測定結果をもとに次の測定基底を選択しながら測定を繰り返してもよい。

【0070】

量子コンピュータ12の変形例として、例えば以下の量子コンピュータを実現してもよい。すなわちこの変形例は、超伝導遅延線52から取り出した伝播光子を吸収した超伝導量子ビット素子22aと、超伝導量子ビット素子22bとの間に、controlled-Zゲートを作用させることで、違う時刻に放出された伝播光子の間に量子もつれを生成し、時間方向の多重化を利用した3次元クラスター状態を生成してもよい。

【0071】

量子コンピュータ12の変形例として、3次元クラスター状態を用いた誤り訂正機能を備えた量子コンピュータを実現してもよい。

【0072】

以上、本発明を実施の形態にもとづいて説明した。これらの実施の形態は例示であり、それらの各構成要素や各処理プロセスの組合せにいろいろな変形例が可能で、またそうした変形例も本発明の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

【0073】

上述した各実施の形態と変形例の任意の組み合わせもまた本発明の実施の形態として有用である。組み合わせによって生じる新たな実施の形態は、組み合わせられる各実施の形態および変形例それぞれの効果をあわせもつ。

【産業上の利用可能性】

【0074】

本発明は、量子もつれ生成装置、量子もつれ生成方法および量子コンピュータに利用可能である。

【符号の説明】

【0075】

10・・・量子もつれ生成装置、

11・・・量子もつれ生成装置、

10

20

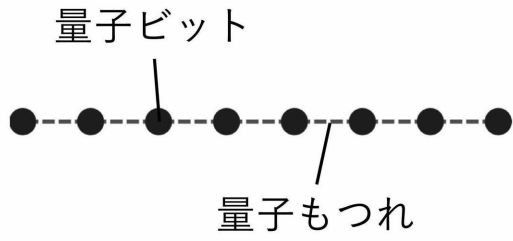
30

40

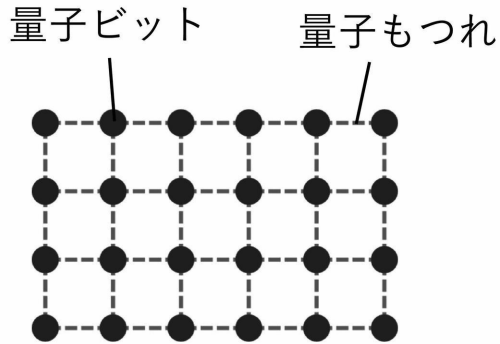
50

1 2	量子コンピュータ、	
2 0 a	超伝導量子ビット素子、	
2 0 b	超伝導量子ビット素子、	
2 1 a	超伝導量子ビット素子、	
2 1 b	超伝導量子ビット素子、	
2 1 c	超伝導量子ビット素子、	
2 2 a	超伝導量子ビット素子、	
2 2 b	超伝導量子ビット素子、	
3 0	結合共振器、	
3 1 a	結合共振器、	10
3 1 b	結合共振器、	
3 2	結合共振器、	
4 0 a	読み出し共振器、	
4 0 b	読み出し共振器、	
4 1 a	読み出し共振器、	
4 1 b	読み出し共振器、	
4 1 c	読み出し共振器、	
4 2 a	読み出し共振器、	
4 2 b	読み出し共振器、	
5 0 a	同軸線、	20
5 0 b	同軸線、	
5 1 a	同軸線、	
5 1 b	同軸線、	
5 1 c	同軸線、	
5 2	超伝導遅延線、	
6 0 a	読み出し線、	
6 0 b	読み出し線、	
6 1 a	読み出し線、	
6 1 b	読み出し線、	
6 1 c	読み出し線、	30
7 0	シリコン基板、	
8 0	導体キャビティ、	
8 1	導体キャビティ、	
1 0 1	第 1 の電極、	
1 0 2	第 2 の電極、	
1 0 3	第 3 の電極、	
J 1	ジョセフソン接合、	
J 2	ジョセフソン接合。	

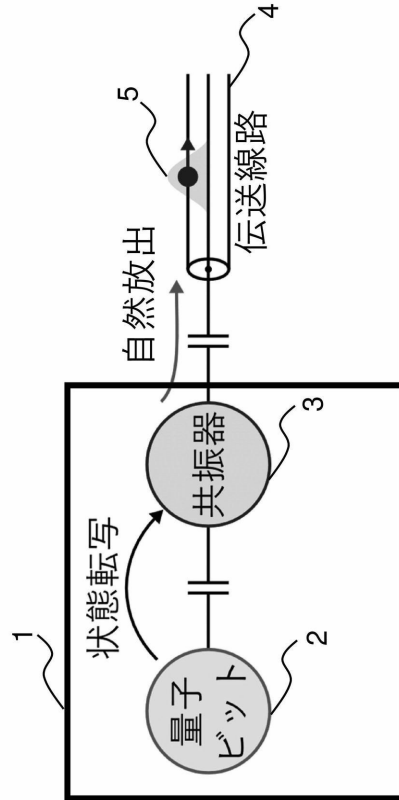
【図1】



【図2】

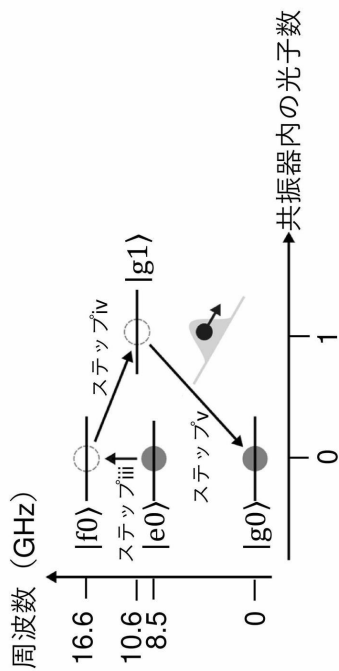


【図3】

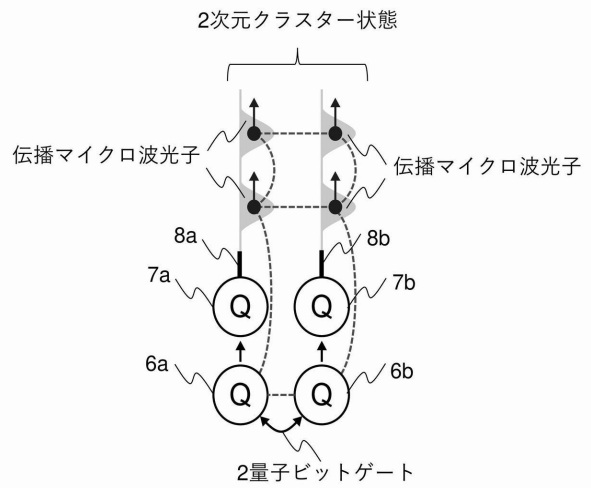


10

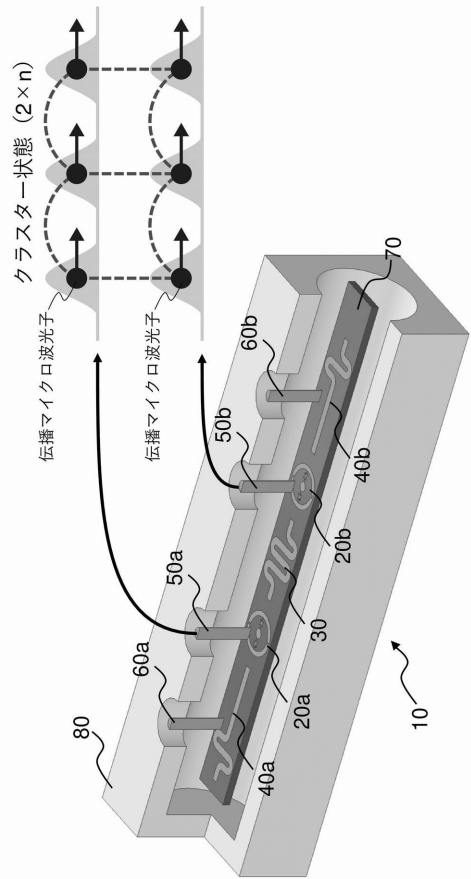
【図4】



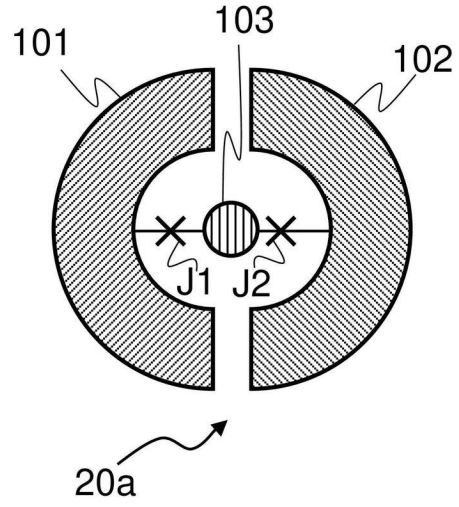
【図5】



【 図 6 】

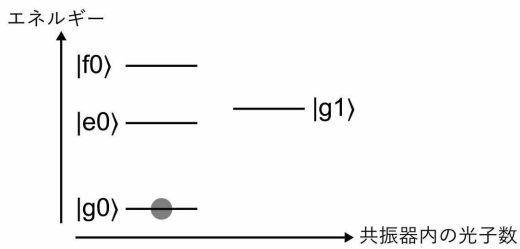
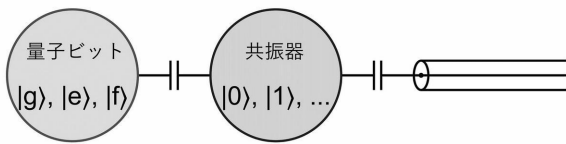


【 図 7 】



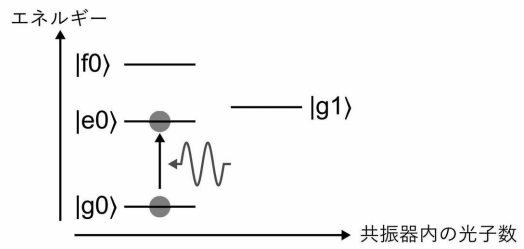
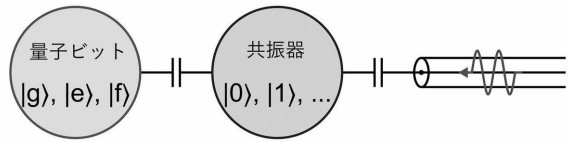
【 図 8 】

ステップ1: $|g\rangle$ に初期化
状態 $|g0\rangle$



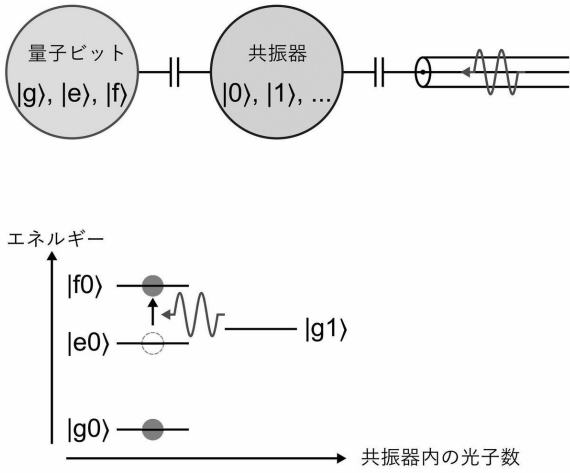
【 図 9 】

ステップ2-1: $|g\rangle$ を $|e\rangle$ に半励起
状態 $|g0\rangle+|e0\rangle$ (重ね合わせ状態)



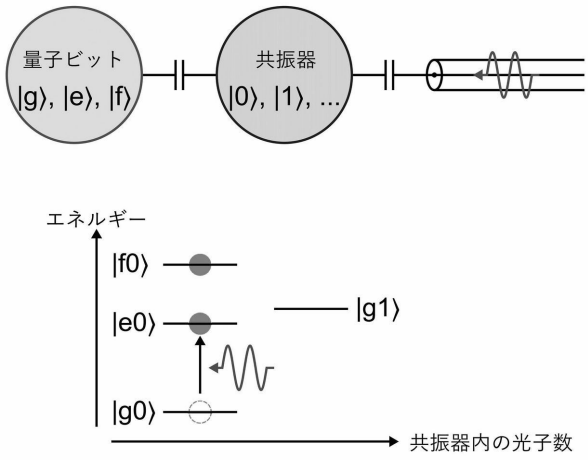
【 図 1 0 】

ステップ2-3： $|e\rangle$ を $|f\rangle$ に励起
状態 $|g0\rangle+|f0\rangle$



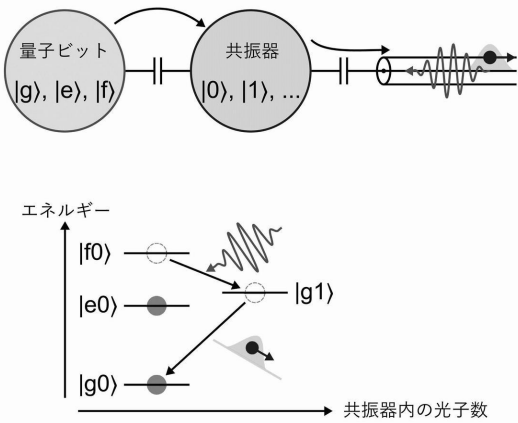
【 図 1 1 】

ステップ2-4： $|g\rangle$ を $|e\rangle$ に励起
状態 $|e0\rangle+|f0\rangle$



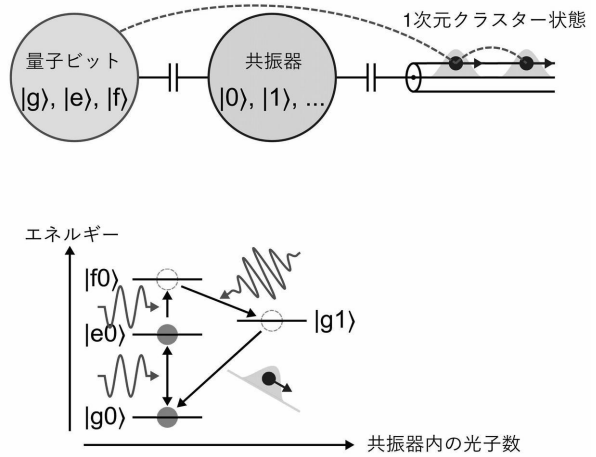
【 図 1 2 】

ステップ2-5： $|f0\rangle$ から $|g1\rangle$ 遷移を駆動。伝播マイクロ波光子を放出。
状態 $|e0\rangle \otimes |0\rangle + |g0\rangle \otimes |1\rangle$

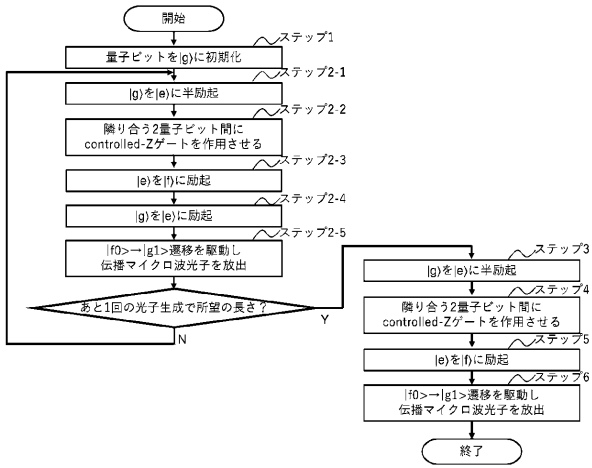


【 図 1 3 】

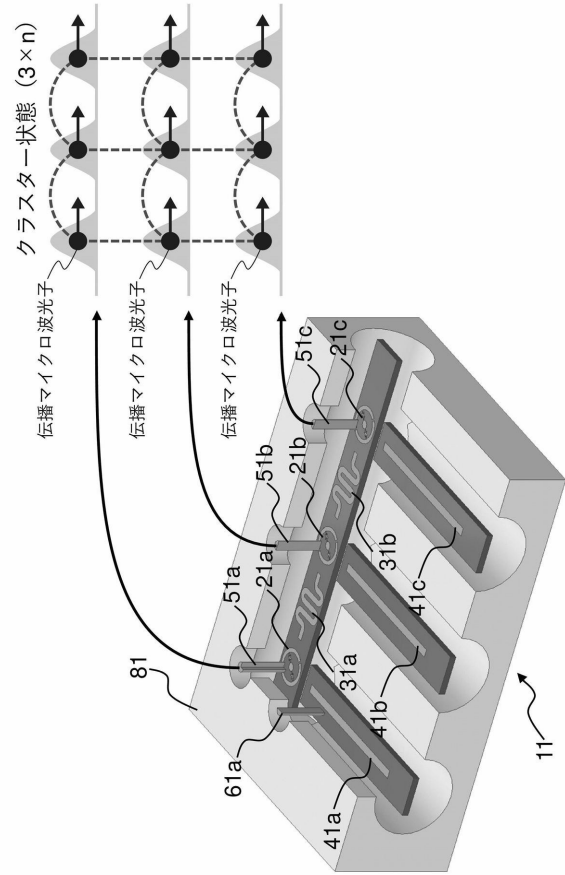
ステップ (2-1) から (2-5) を、
「所望の光子鎖長 - 1 回」繰り返す



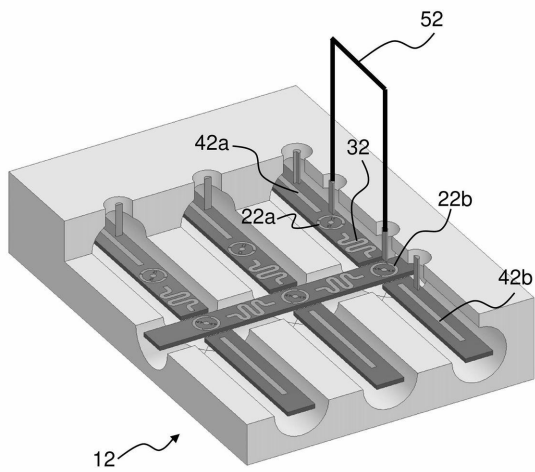
【図14】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2019-15872(JP,A)

特開2007-250771(JP,A)

砂田 佳希, 河野 信吾, Jesper Ilves, 玉手 修平, 田淵 豊, 中村 泰信, 超伝導量子ビットから伝搬マイクロ波パルスへの高速な量子状態転写, 日本物理学会2019年秋季大会概要集, 日本, 一般社団法人日本物理学会, 2019年, p.482, [検索日 2022.03.28], インターネット: <URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpsgaiyo/74.2/0/74.2_482/_pdf/-char/ja>, Web版 ISSN 2189-0803 DVD版 ISSN 2189-079X

Zhedong Zhang, Marlan O. Scully and Girish S. Agarwal, Quantum entanglement between two magnon modes via Kerr nonlinearity driven far from equilibrium, PHYSICAL REVIEW RESEARCH 1, Volume 1, Issue 2 - September 2019, 米国, The American Physical Society [オンライン], 2019年09月19日, p.023021-1 - 023021-7, [検索日 2022.03.28], インターネット: <URL: <https://journals.aps.org/prresearch/pdf/10.1103/PhysRevResearch.1.023021>> <DOI: 10.1103/PhysRevResearch.1.023021>

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 6 N 1 0 / 4 0