

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7372681号
(P7372681)

(45)発行日 令和5年11月1日(2023.11.1)

(24)登録日 令和5年10月24日(2023.10.24)

(51)国際特許分類	F I
H 1 0 N 60/12 (2023.01)	H 1 0 N 60/12 A
G 0 6 F 7/38 (2006.01)	G 0 6 F 7/38 5 1 0
G 0 6 N 10/00 (2022.01)	G 0 6 N 10/00
H 0 3 K 19/195(2006.01)	H 0 3 K 19/195

請求項の数 15 (全33頁)

(21)出願番号 特願2020-536949(P2020-536949)	(73)特許権者 593152720
(86)(22)出願日 平成31年1月5日(2019.1.5)	イェール ユニバーシティ
(65)公表番号 特表2021-509771(P2021-509771 A)	Yale University
(43)公表日 令和3年4月1日(2021.4.1)	アメリカ合衆国 コネチカット 0 6 5 1 0 , ニュー ヘイブン , ウィットニー アベニュー 2
(86)国際出願番号 PCT/US2019/012440	2 Whitney Avenue , N ew Haven , CT 0 6 5 1 0 , United States of Am erica
(87)国際公開番号 WO2019/156759	(74)代理人 100095832
(87)国際公開日 令和1年8月15日(2019.8.15)	弁理士 細田 芳徳
審査請求日 令和3年12月28日(2021.12.28)	(74)代理人 100187850
(31)優先権主張番号 62/613,937	弁理士 細田 芳弘
(32)優先日 平成30年1月5日(2018.1.5)	(72)発明者 ジアン , リアン
(33)優先権主張国・地域又は機関 米国(US)	
(31)優先権主張番号 62/733,326	
(32)優先日 平成30年9月19日(2018.9.19)	
最終頁に続く	最終頁に続く

(54)【発明の名称】 エラー強さのある量子論理ゲート

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の空洞(111)および第2の空洞(121)を含む複数の空洞の間で、制御-SWAP(c-SWAP)ゲートおよび/または指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを含む量子論理ゲートを実行するための方法であって、第1のキュービットが前記第1の空洞(111)にエンコードされ、第2のキュービットが前記第2の空洞(121)にエンコードされ、該方法が：
前記第1の空洞(111)および前記第2の空洞(121)の両方に分散的に連結される連結トランスモン(131)にマイクロ波照射を適用することにより、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第1のビームスプリッター(BS)操作を実行する工程；ならびに前記第1の空洞(111)に連結されるのではなく前記第2の空洞(121)に分散的に連結されるアンシラトランスモン(151)にマイクロ波照射を適用することにより、前記第2の空洞(121)と前記アンシラトランスモン(151)との間で制御位相シフト(CPS)操作を実行する工程を含む、方法。

【請求項2】

前記量子論理ゲートが、c-SWAPゲートを含む、方法であって、該方法が、前記連結トランスモン(131)を使用して、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第2のBS操作を実行する工程をさらに含み、前記第1のBS操作が前記CPS操作の前に実行され、前記第2のBS操作が前記CPS操作の後に実行され、前記第1のBS操作が $\pi/4$ の位相で実行され、前記第2のBS操作が $\pi - \pi/4$ の位相で実行される、請求項1記載の方法。

【請求項3】

10

20

前記量子論理ゲートがe-SWAPゲートを含む、方法であって、該方法が：
 前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第1のc-SWAPゲートを実行する工程；
 前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第2のc-SWAPゲートを実行する工程；
 および
 前記第1のc-SWAPゲートと前記第2のc-SWAPゲートの間に、前記アンシラトランスモン(151)上で回転操作を実行する工程
 を含む、請求項2記載の方法。

【請求項4】

前記量子論理ゲートがe-SWAPゲートを含み、前記CPS操作が第1のCPS操作である、方法であって、該方法が：

前記第2の空洞(121)と前記アンシラトランスモン(151)の間で、前記第1のCPS操作の後および前記第2のBS操作の前に第2のCPS操作を実行する工程；ならびに
 前記第1のCPS操作と前記第2のCPS操作の間に、前記アンシラトランスモン(151)上で回転操作を実行する工程
 を含む、請求項2記載の方法。

【請求項5】

前記第1のCPS操作の前および前記第1のBS操作の後に、前記アンシラトランスモン(151)に対して第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに
 前記第2のCPS操作の後および前記第2のBS操作の前に、前記アンシラトランスモン(151)に対して第2のアダマール操作を実行する工程
 をさらに含む、請求項4記載の方法。

【請求項6】

前記第1のBS操作の実行前に前記アンシラトランスモン(151)の状態を初期化する工程
 前記第2のBS操作の実行後に前記アンシラトランスモン(151)を測定する工程、および
 前記アンシラトランスモン(151)の測定の結果に基づいて、離調誤りが起こったことを決定する工程
 をさらに含む、請求項5記載の方法。

【請求項7】

少なくとも4エネルギー準位の前記アンシラトランスモン(151)が使用され；
 第1のエネルギー準位の前記アンシラトランスモン(151)が第1の減衰誤りの型に関連し；
 ；
 第2のエネルギー準位の前記アンシラトランスモン(151)が第2の減衰誤りの型に関連し；
 ；
 該方法が、前記アンシラトランスモン(151)の測定の結果に基づいて減衰誤りを訂正する工程をさらに含む、請求項6記載の方法。

【請求項8】

前記CPS操作の前および/または後に、前記アンシラトランスモン(151)上で少なくとも1つのローカル量子論理ゲートが実行され、前記少なくとも1つのローカル量子論理ゲートが、前記BS操作の後および前記CPS操作の前に実行される第1のアダマール操作を含み；
 該方法が、前記アンシラトランスモン(151)の状態を測定して、前記第1の空洞(111)の第1の量子状態と前記第2の空洞(121)の第2の量子状態を比較する工程をさらに含む、請求項1記載の方法。

【請求項9】

前記複数の空洞が、第3の空洞および第4の空洞をさらに含み；第3のキュービットが前記第3の空洞にエンコードされ、第4のキュービットが前記第4の空洞にエンコードされ、前記連結トランスモン(131)が第1の連結トランスモンであり；
 前記アンシラトランスモン(151)が、前記第4の空洞に連結されるのではなく前記第3の空洞に分散的に連結され；
 前記CPS操作が第1のCPS操作であり；
 該方法が：

10

20

30

40

50

前記第3の空洞および前記第4の空洞の両方に分散的に連結される第2の連結トランスモンを使用して、前記第3の空洞と前記第4の空洞の間で、第3のBS操作を実行する工程；ならびに

前記第3の空洞と前記アンシラトランスモン(151)の間で第2のCPS操作を実行する工程をさらに含む、請求項2記載の方法。

【請求項10】

前記第2の連結トランスモンを使用して、前記第3の空洞と前記第4の空洞の間で、第4のBS操作を実行する工程、ここで前記第4のBS操作は前記第2のCPS操作の前に実行され、前記第2のBS操作は前記第2のCPS操作の後に実行される；

前記第2のCPS操作の後および前記第4のBS操作の前に、前記第3の空洞と前記アンシラトランスモン(151)の間で、第3のCPS操作を実行する工程；

前記第2のCPS操作と前記第3のCPS操作の間に、前記アンシラトランスモン(151)上で回転操作を実行する工程；

前記第3のCPS操作の後および前記第2のBS操作の前に、前記第2の空洞(121)と前記アンシラトランスモン(151)の間で、第4のCPS操作を実行する工程；

前記第1のCPS操作の前および前記第1と第3のBS操作の後に、前記アンシラトランスモン(151)に対して第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに

前記第4のCPS操作の後および前記第2と第4のBS操作の前に、前記アンシラトランスモン(151)に対して第2のアダマール操作を実行する工程

をさらに含む、請求項9記載の方法。

【請求項11】

マイクロ波照射を支持するように構成される第1の空洞(111)；

マイクロ波照射を支持するように構成される第2の空洞(121)；

前記第1の空洞(111)に分散的に連結される第1のトランスモン(141)；

前記第2の空洞(121)に分散的に連結される第2のトランスモン(151)；

前記第1の空洞(111)および前記第2の空洞(121)の両方に分散的に連結される第3のトランスモン(131)；ならびに

マイクロ波供給源(106)、ここで前記マイクロ波供給源(106)は、第1のキュービットが前記第1の空洞にエンコードされ、第2のキュービットが前記第2の空洞にエンコードされる場合に、

マイクロ波照射を前記第3のトランスモン(131)に適用して、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間でビームスプリッター(BS)操作を実行し、

マイクロ波照射を前記第1のトランスモン(141)または前記第2のトランスモン(151)に適用して、前記第1のトランスモン(141)または前記第2のトランスモン(151)のそれぞれ上でトランスモン回転操作を実行し、

マイクロ波照射を前記第1のトランスモン(141)および前記第2のトランスモン(151)に適用して、前記第1の空洞(111)と前記第1のトランスモン(141)の間および前記第2の空洞(121)と前記第2のトランスモン(151)の間のそれぞれで制御位相シフト(CPS)操作を実行する

ように構成される、

を含む、多空洞量子情報系。

【請求項12】

前記マイクロ波供給源(106)がさらに、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間での1つ以上のBS操作、前記第1のトランスモン(141)および/または前記第2のトランスモン(151)での1つ以上のトランスモン回転操作、および/または前記第1の空洞(111)と前記第1のトランスモン(141)の間および/または前記第2の空洞(121)と前記第2のトランスモン(151)の間でのCPS操作を実行することにより、マイクロ波照射を前記第1、第2および第3のトランスモン(141、151、131)に適用して、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で一組のユニバーサル量子ゲートを実行するように構成される、請求項11記載の多空洞量子情報系。

10

20

30

40

50

【請求項 1 3】

前記マイクロ波供給源(106)がさらに、マイクロ波照射を前記第3のトランスモンに適用して前記第1の空洞と前記第2の空洞の間での第1のビームスプリッター(BS)操作を実行する工程、マイクロ波照射を前記第1のトランスモンまたは前記第2のトランスモンに適用して前記第1の空洞または前記第2の空洞と前記それぞれの第1のトランスモンまたは第2のトランスモンの間で制御位相シフト(CPS)操作を実行する工程、およびCPS操作の実行後、マイクロ波照射を前記第3のトランスモンに適用して前記第1の空洞と前記第2の空洞の間で第2のBS操作を実行する工程により、前記第1の空洞と前記第2の空洞の間で制御-SWAP(c-SWAP)ゲートを実行するように構成される、多空洞量子情報系であって、前記第1のBS操作が $= \pi/4$ の位相で実行され、前記第2のBS操作が $= -\pi/4$ の位相で実行される、請求項 1 1 記載の多空洞量子情報系。

10

【請求項 1 4】

前記マイクロ波供給源(106)がさらに、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第1のc-SWAPゲートを実行する工程、前記第1の空洞(111)と前記第2の空洞(121)の間で第2のc-SWAPゲートを実行する工程、および前記第1のc-SWAPゲートと前記第2のc-SWAPゲートの間に前記第2のトランスモン(151)上で回転操作を実行する工程により、前記第1の空洞と前記第2の空洞の間で指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを実行するように構成される、請求項 1 3 記載の多空洞量子情報系。

【請求項 1 5】

前記マイクロ波供給源(106)がさらに：

マイクロ波照射を前記第1および/または第2のトランスモン(141、151)に適用して、前記第1および/または第2のトランスモン(141、151)の測定を可能にし；

マイクロ波照射を前記第1、第2および/または第3のトランスモン(141、151、131)に適用して、前記第1および/または第2のトランスモン(141、151)の測定の結果に基づいて、量子ゲートを実行するように構成される、請求項 1 1 記載の多空洞量子情報系。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願についての相互参照

30

本願は、2018年1月5日に出願された発明の名称「ROBUST QUANTUM LOGICAL GATES」の米国仮特許出願第62/613,937号および2018年9月19日に出願された発明の名称「ROBUST QUANTUM LOGICAL GATES」の米国仮特許出願第62/733,326号の35 U.S.C. § 119(e)下の利益を主張し、それらの両方はそれらの全体において参照により本明細書に援用される。

【0002】

連邦政府により支援される研究

本発明は、米国陸軍研究局により授与されたW911NF-14-1-0011の下、政府支援によりなされた。政府は本発明に一定の権利を有する。

【背景技術】

40

【0003】

背景

量子情報処理は、エネルギー量子化、重ね合わせおよびもつれなどの量子力学的現象を使用して、従来の情報処理では使用されない方法で情報をエンコードして処理する。例えば、特定のコンピューター計算問題は、従来の古典的コンピューター計算ではなく量子コンピューター計算を使用してより効率的に解かれ得ることが知られる。しかしながら、現実的なコンピューターの選択肢になるために、量子コンピューター計算は、「キュービット」として知られる量子ビットの多くおよびこれらのキュービットの間の相互作用を正確に制御する能力を必要とする。特に、キュービットは、長いコヒーレンス時間を有し、個々に操作可能され得、多キュービットゲートを実行するために1つ以上の他のキュービッ

50

トと相互作用し得、効率的に初期化および測定され得、多くのキュービットへと大規模化可能であるべきである。

【0004】

キュービットは、少なくとも2つの直交する状態を有する任意の物理的量子力学系から形成され得る。情報をエンコードするために使用される系の2つの状態は、「コンピューター計算基底(computational basis)」と称される。例えば、光子偏向、電子スピンおよび核スピンは、情報をエンコードし得、そのために量子情報処理のためのキュービットとして使用され得る二準位系である。キュービットの異なる物理的実行は、異なる利点および欠点を有する。例えば、光子偏向は、長いコヒーレンス時間および単純な単一キュービット操作により利益を受けるが、単純な多キュービットゲートを作成できないこと欠点としてもつ。

10

【0005】

コンピューター計算基底がジョセフソン接合におけるクーパー対の量子化されたエネルギー状態である「位相キュービット」；コンピューター計算基底が超伝導ループにおける循環電流フローの方向である「フラックスキュービット」；およびコンピューター計算基底が超伝導島(superconducting island)のクーパー対の存在または非存在である「電荷キュービット」等のジョセフソン接合を使用する異なる種類の超伝導キュービットが提唱されている。超伝導キュービットは、2つのキュービットの間の連結が強力であり、2キュービットゲートを実行するのに比較的単純にするのでキュービットの有利な選択であり、超伝導キュービットは従来の電子回路技術を使用して形成され得るメゾスコピック構成要素であるので、大規模化可能である。さらに、超伝導キュービットは、優れた量子コヒーレンスおよびジョセフソン効果に関連する強力な非線形性を示す。全ての超伝導キュービット設計は、非線形な非エネルギー散逸的要素として少なくとも1つのジョセフソン接合を使用する。

20

【発明の概要】

【0006】

概要

いくつかの局面によると、第1の空洞および第2の空洞を含む複数の空洞の間で量子論理ゲートを実行するための方法が提供され、該方法は：第1の空洞および第2の空洞の両方に分散的に連結される連結トランスモンを使用して第1の空洞と第2の空洞の間で第1のビームスプリッター(BS)操作を実行する工程；ならびに第2の空洞と、第1の空洞には分散的に連結されずに第2の空洞に分散的に連結されるアンシラトランスモンとの間で制御位相シフト(CPS)操作を実行する工程を含む。

30

【0007】

いくつかの態様によると、該方法はさらに、連結トランスモンを使用して第1の空洞と第2の空洞の間で第2のBS操作を実行する工程を含み、ここで第1のBS操作はCPS操作の前に実行され、第2のBS操作はCPS操作後に実行される。

【0008】

いくつかの態様によると、量子論理ゲートは、制御-SWAP(c-SWAP)操作を含む。

【0009】

いくつかの態様によると、量子論理ゲートは、指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを含み、該方法は：第1の空洞と第2の空洞の間で第1のc-SWAP操作を実行する工程；第1の空洞と第2の空洞の間で第2のc-SWAP操作を実行する工程；および第1のc-SWAP操作と第2のc-SWAP操作の間にアンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程を含む。

40

【0010】

いくつかの態様によると、量子論理ゲートは、指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを含み、CPS操作は第1のCPS操作であり、該方法は：第1のCPS操作の後および第2のBS操作の前に第2の空洞とアンシラトランスモンの間で第2のCPS操作を実行する工程；ならびに第1のCPS操作と第2のCPS操作の間にアンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程を含む。

50

【 0 0 1 1 】

いくつかの態様によると、該方法はさらに：第1のCPS操作の前および第1のBS操作の後に第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに第2のCPS操作の後および第2のBS操作の前に第2のアダマール操作を実行する工程を含む。

【 0 0 1 2 】

いくつかの態様によると、該方法はさらに、アンシラトランスモンを測定する工程を含む。

【 0 0 1 3 】

いくつかの態様によると、該方法はさらに、アンシラトランスモンの測定の結果に基づいて離調エラー離調エラーが生じたことを決定する工程を含む。

10

【 0 0 1 4 】

いくつかの態様によると、アンシラトランスモンの少なくとも4エネルギー準位が使用され；アンシラトランスモンの第1のエネルギー準位は、第1の減衰エラーの種類に関連し；アンシラトランスモンの第2のエネルギー準位は、第2の減衰エラーの種類に関連し；該方法はさらに、アンシラトランスモンの測定の結果に基づいて、減衰エラーを訂正する工程を含む。

【 0 0 1 5 】

いくつかの態様によると、少なくとも1つのローカル量子論理ゲートは、CPS操作の前および/または後にアンシラトランスモン上で実行される。

【 0 0 1 6 】

いくつかの態様によると、少なくとも1つのローカル量子論理ゲートは、BS操作の後およびCPS操作の前に実行される第1のアダマール操作を含み；該方法はさらに、アンシラトランスモンの状態を測定して、第1の空洞の第1の量子状態と、第2の空洞の第2の量子状態を比較する工程を含む。

20

【 0 0 1 7 】

いくつかの態様によると、複数の空洞はさらに第3の空洞および第4の空洞を含み；連結トランスモンは第1の連結トランスモンであり；アンシラトランスモンは、第4の空洞に分散的に連結されるのではなく第3の空洞に分散的に連結され；CPS操作は第1のCPS操作であり；該方法はさらに：第3の空洞と第4の空洞の両方に分散的に連結される第2の連結トランスモンを使用して、第3の空洞と第4の空洞の間で第3のBS操作を実行する工程；および第3の空洞とアンシラトランスモンの間で第2のCPS操作を実行する工程を含む。

30

【 0 0 1 8 】

いくつかの態様によると、該方法はさらに：第2の連結トランスモンを使用して第3の空洞と第4の空洞の間で第4のBS操作を実行する工程、ここで第4のBS操作は第2のCPS操作の前に実行され、第2のBS操作は第2のCPS操作の後に実行される；第2のCPS操作の後および第4のBS操作の前に、第3の空洞とアンシラトランスモンの間で第3のCPS操作を実行する工程；第2のCPS操作と第3のCPS操作の間にアンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程；ならびに第3のCPS操作の後および第2のBS操作の前に、第2の空洞とアンシラトランスモンの間で第4のCPS操作を実行する工程を含む。

【 0 0 1 9 】

いくつかの態様によると、該方法はさらに：第1のCPS操作の前および第1と第3のBS操作の後に第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに第4のCPS操作の後および第2と第4のBS操作の前に第2のアダマール操作を実行する工程を含む。

40

【 0 0 2 0 】

いくつかの局面によると、マイクロ波照射を支持するように構成される第1の空洞；マイクロ波照射を支持するように構成される第2の空洞；第1の空洞に分散的に連結される第1のトランスモン；第2の空洞に分散的に連結される第2のトランスモン；第1の空洞と第2の空洞の両方に分散的に連結された第3のトランスモン；ならびにマイクロ波照射を第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間でビームスプリッター操作およびトランスモン回転操作を実行し、マイクロ波照射を第1のトランスモンおよび第2のトランス

50

モンに適用して、第1の空洞および第2の空洞のそれぞれ上で制御位相シフト操作を実行するように構成されるマイクロ波供給源を含む、多空洞量子情報系が提供される。

【0021】

いくつかの態様によると、マイクロ波供給源はさらに、マイクロ波照射を第1のトランスモンおよび第2のトランスモンに適用して、第1のトランスモンおよび第2のトランスモンのそれぞれ上で任意の回転操作を実行するように構成される。

【0022】

いくつかの態様によると、マイクロ波供給源はさらに、マイクロ波照射を、第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で一組のユニバーサル量子ゲートを実行するように構成される。

10

【0023】

いくつかの態様によると、マイクロ波供給源はさらに、マイクロ波照射を、第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で制御-SWAPゲートを実行するように構成される。

【0024】

いくつかの態様によると、マイクロ波供給源はさらに、マイクロ波照射を、第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で指数関数的-SWAPゲートを実行するように構成される。

【0025】

いくつかの態様によると、マイクロ波供給源はさらに：マイクロ波照射を、第1および/または第2のトランスモンに適用して、第1および/または第2のトランスモンを測定する；ならびにマイクロ波照射を、第1、第2および/または第3のトランスモンに適用して、第1および/または第2のトランスモンの測定の結果に基づいて、量子ゲートを実行するように構成される。

20

【図面の簡単な説明】

【0026】

図面の簡単な説明

以下の図面を参照して、開示される技術の種々の局面および態様を説明する。図は必ずしも一定の比例で描かれていないことが理解されるべきである。

【図1】図1Aは、いくつかの態様による、多空洞量子情報系の概略図である。図1Bは、いくつかの態様による、図1Aの例示的な空洞および多空洞量子情報系のトランスモンの概略図である。

30

【図2】図2Aは、いくつかの態様による、制御-SWAP(c-SWAP)を図示する。図2Bは、いくつかの態様による、図2Aのc-SWAPゲートを実行する方法を図示する。図2Cは、いくつかの態様による、線形光学機器に基づくc-SWAPゲートの概略を図示する。

【図3】図3Aは、いくつかの態様による、2つの空洞の間の指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを図示する。図3Bは、いくつかの態様による、図3Aのe-SWAPゲートを実行するための方法を図示する。図3Cは、いくつかの態様による、図3Aのe-SWAPゲートを実行するための方法を図示する。

【図4 - 1】図4Aは、いくつかの態様による、4つの空洞の間の指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを図示する。図4Bは、いくつかの態様による、図4Aのe-SWAPゲートを実行するための方法を図示する。

40

【図4 - 2】図4Cは、いくつかの態様による、図4Aのe-SWAPゲートを実行するための方法を図示する。

【図5】図5Aは、いくつかの態様による、4準位トランスモンエネルギー構造を図示する。図5Bは、いくつかの態様による、6準位トランスモンエネルギー構造を図示する。

【図6】図6は、いくつかの態様による、量子状態比較を実行する方法を図示する。

【発明を実施するための形態】

【0027】

詳細な説明

50

超伝導回路を用いた量子情報処理についての従来のアプローチにおいて、情報は、バス共振器におけるマイクロ波光子の交換を介して、または直接容量性連結を介して、一緒になって連結されるジョセフソン接合に基づくキュービット(例えばトランスモン)に記憶される。本発明者らは、光子キュービットのユニバーサル量子制御を与えるために、量子情報が記憶され、アンシラとして作用するトランスモンを有する高-Q共振器のマイクロ波光子状態中で操作される、異なるおよび相補的なアーキテクチャーは、従来のアプローチに対して有意な利点を有することを認識し、理解している。第1に、マイクロ波空洞のコヒーレンス時間は、超伝導キュービットのコヒーレンス時間よりも長い。例えば、三次元超伝導マイクロ波空洞は、アルミニウムにおいて非常に高い品質要素アプローチ109を達成し得、ニオブにおいてさらに高い品質要素アプローチを達成し得、アルミニウム空洞について

10

の空洞コヒーレンス時間は、トランスモンの空洞コヒーレンス時間を二桁超える。第2に、情報がエンコードされ得る状態の数は、超伝導キュービットにおけるよりもマイクロ波空洞においてより大きい。例えば、空洞モードのより高い励起レベルは、利用可能なヒルベルト空間を拡張させるので、単一空洞モードは、空洞離調、励起損失(excitation loss)または熱加熱(thermal heating)を含む種々の欠陥に対する量子エラー訂正と適合する様式で情報の量子ビットをエンコードするために使用され得る。

【0028】

本発明者らは、マイクロ波空洞を使用することのこれらの利点は、量子情報処理および量子エラー訂正を補助するためのアンシラとしてトランスモンを使用しながら、量子情報がマイクロ波空洞の量子状態に記憶される量子情報処理に特有のアプローチにおいて利用され得ることを認識し、理解した。この「光子キュービット」アプローチは、量子情報がトランスモンに記憶され、マイクロ波光子モードがトランスモンを連結するための量子バスとして使用される従来のアプローチの逆である。得られる超伝導空洞-トランスモン系は、空洞モード、損益なしの点に到達する量子エラー訂正、2つの空洞に対する連結(joint)パリティ測定およびトランスモン制御器により補助される空洞の間の決定論的連結ゲートを超えるユニバーサル量子制御を可能にする。

20

【0029】

本発明者らはさらに、超伝導空洞-トランスモン系は、空洞-トランスモン連結の際のトランスモンデコヒーレンスのために、量子操作の制限された忠実度に遭遇し得ることを認識し、理解している。本発明者らは、トランスモンのコヒーレンス特性を実験的に向上することに加えて、量子操作の忠実度は、トランスモンからのデコヒーレンスおよび他のジョセフソン非線形デバイスによるエラーを抑制するかまたはさらに積極的に訂正するエラー強さのあるアプローチを実行することにより向上され得ることを認識し、理解している。

30

【0030】

本発明者らはさらに、量子論理ゲートのユニバーサルセットは「エンコード不自然的(encoding agnostic)」であり、量子情報が、空洞の量子状態に論理的にエンコードされるためにどのように選択されたとしても(例えば猫状態エンコード、コヒーレンス状態エンコード、フォック状態エンコード等)、量子論理ゲートのセットはユニバーサルであるままであることを意味することを認識し、理解している。さらに、量子論理ゲートのユニバーサルセットを実行するために使用されるハードウェアは、選択されるエンコードスキームとは独立して同じままである。

40

【0031】

いくつかの態様によると、多マイクロ波空洞は、トランスモンなどの1つ以上のジョセフソン非線形デバイスを使用して、一緒になって制御および/または連結される。いくつかの態様において、連結トランスモンは、2つの空洞の間で操作を実行するために使用される。かかる操作の例としては、第1の空洞の量子状態を第2の空洞の量子状態に連結する(およびその逆)ビームスプリッター(BS)操作が挙げられる。これらの操作は、ビームスプリッターが線形光学機器量子コンピューター計算(LQCC)スキームにおいて行う場合と同じ役割を果たし、同じユニタリー操作を行うので、ビームスプリッター操作と称される。

【0032】

10

20

30

40

50

いくつかの態様において、単一の空洞に連結されるアンシラトランスモンは、単一の空洞とトランスモンの間で制御位相シフト(CPS)操作を実行するために使用される。いくつかの態様において、アンシラトランスモンはまた、アンシラトランスモン自体の量子状態上で回転を実行するように制御され得る。

【 0 0 3 3 】

本発明者らは、BS操作、CPS操作およびアンシラトランスモンの回転は、ユニバーサルゲートに基づく量子コンピューター計算を実行するのに十分であることを認識し、理解している。いくつかの態様において、上述の操作は、c-SWAPゲートおよび/またはe-SWAPゲートを実行するために使用される。e-SWAPゲートは、ボゾンコード空間を保存しながら空洞モードを連結する。この方法において、ボゾンモードの間のもつれ操作は、試料される論理エンコードに関係なく達成され得る。いくつかの態様は、トランスモンデコヒーレンスによる欠陥を知らせ(herald)得るe-SWAPゲートのエラー強さのある設計を利用する。いくつかの態様は、量子ルーター、量子ランダムアクセスメモリ(RAM)、量子主成分分析およびゲートに基づくユニバーサル量子コンピューター計算などの1つ以上の適用についてc-SWAPゲートおよびe-SWAPゲートを使用した。

10

【 0 0 3 4 】

トランスモン超伝導キュービットが多くの態様の構成要素として本明細書に記載されるが、いくつかの態様において他の種類の超伝導デバイスが使用され得ることに注意されたい。

【 0 0 3 5 】

図1は、いくつかの態様による、多空洞量子情報系100の概略図である。多空洞量子情報系100は、第1の空洞101、第2の空洞102、連結トランスモン103、第1のアンシラトランスモン104、第2のアンシラトランスモン105およびマイクロ波供給源106を含む。図1の例示的な系100において2つの空洞および2つのアンシラトランスモンのみが示されるが、他の態様はさらなる空洞およびトランスモンを含み得る。

20

【 0 0 3 6 】

第1の空洞101および第2の空洞102は、マイクロ波照射の量子状態を支持する任意の種類の空洞であり得る。例えば、いくつかの態様において、第1の空洞101および第2の空洞102は、アルミニウムなどの超伝導材料で形成される伝送路共振器または三次元空洞であり得る。

30

【 0 0 3 7 】

連結トランスモン103は、第1の空洞101および第2の空洞102の両方に分散的に連結されるトランスモンであり得る。連結トランスモン103は、2つの空洞の量子状態の間の相互作用を提供し、第1の空洞101と第2の空洞102の間で実行されるBS相互作用などの相互作用を可能にする。

【 0 0 3 8 】

第1のアンシラトランスモン104および第2のアンシラトランスモン105は、第1の空洞101および第2の空洞102のそれぞれに分散的に連結される。それぞれのアンシラトランスモンは、量子情報を記憶するために使用される任意の他の空洞にではなく、系100の単一の空洞に連結される。アンシラトランスモン104および105は、トランスモン104および105自体の量子状態の回転を実行するように制御され得る。さらに、アンシラトランスモン104および105は、関連する空洞101および102のそれぞれと相互作用して、CPS相互作用などの制御相互作用を実行するように制御され得る。

40

【 0 0 3 9 】

マイクロ波供給源106は、第1の空洞101、第2の空洞102、第1のアンシラトランスモン104、第2のアンシラトランスモン105および連結トランスモン103に連結され得る。マイクロ波供給源106と他の構成要素の間の連結は、マイクロ波供給源がマイクロ波照射を、多空洞量子情報系100の構成要素のそれぞれに適用する経路を提供する。いくつかの態様において、マイクロ波供給源106は、構成要素のそれぞれに、容量的に連結され得る。

50

【 0 0 4 0 】

図1Bは、いくつかの態様による、図1Aの多空洞量子情報系100(簡易化のためにマイクロ波供給源106は示されない)の役割を果たし得る特定の例示的な系110の概略図である。系110は、第1の三次元(3D)空洞111、第2の3D空洞121、連結デバイス131、第1のアンシラデバイス141および第2のアンシラデバイス151を含む。

【 0 0 4 1 】

第1および第2の3D空洞111および112は、中心スタブ114および124のそれぞれと外壁115および125のそれぞれの間で $1/4$ 伝送路共振器の3Dバージョンとして働く。例えば、中心スタブ114および124の直径は3.2mmであり得、外壁115および125の直径は9.5mmであり得る。しかしながら、態様は任意の特定の寸法に限定されないことに注意されたい。空洞101および102のそれぞれの共振周波数は、それらのそれぞれの空洞内の中心スタブ114および124の高さにより決定され得る。例えば、中心スタブ114は4.8mmの高さを有し得、第2の中心スタブ124は5.6mmの高さを有し得る。第1の3D空洞111は、第1の周波数のマイクロ波照射112を支持し、第2の3D空洞121は、第1の周波数とは異なる第2の周波数のマイクロ波照射122を支持する。いくつかの態様において、第1の空洞111および第2の空洞121は、マイクロ波供給源106からのマイクロ波照射がそれを通して適用され得るポート113および123のそれぞれを含む。マイクロ波照射を空洞に適用することは、例えば、空洞の量子状態上の変位操作を実行し得る。

10

【 0 0 4 2 】

連結デバイス131は、第1の空洞111と第2の空洞121の間で非線形相互作用を提供する連結トランスモン134を含む。トランスモン134は、少なくとも部分的に第1の空洞111に挿入される第1のアンテナ135および少なくとも部分的に第2の空洞121に挿入される第2のアンテナ136に連結され、それぞれのアンテナの少なくとも一部は、そのそれぞれの空洞内に突出する。第1および第2のアンテナ135/136は、例えば、第1および第2の空洞111/121のそれぞれに容量的連結を提供する円形パッドであり得る。

20

【 0 0 4 3 】

連結デバイス131はまた、トランスモン134の状態を読み出す能力を提供する共振器138を含む。第3のアンテナ137は、共振器138を共振器138に連結する。いくつかの態様において、共振器138は、第1の空洞111または第2の空洞121のいずれかよりも低いQ値を有する準平面共振器である。いくつかの態様において、トランスモン134および共振器134は、単一のサファイア基板上に作製される。マイクロ波照射の読み出しパルスはポンプポート132により受信され得、得られたマイクロ波信号は読み出しポート133から受信され得る。

30

【 0 0 4 4 】

連結デバイス131のトランスモン134の非線形性は、第1の空洞111と(an)第2の空洞121の間の周波数変換二線形(bilinear)連結を実行するために使用される4波混合を可能にする。4波混合はポンプポート132を介してトランスモン134をポンピングすることにより制御され、マイクロ波照射は、周波数適合条件 $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{p2} - \omega_{p1}$ (式中、 ω_1 は第1の空洞111の共振周波数であり、 ω_2 は第2の空洞121の共振周波数であり、 ω_{p1} はモードcと関連する第1のポンプの周波数であり、 ω_{p2} は、モードdと関連する第2のポンプの周波数である)を満たす。この連結は、空洞モードの間で有効な時間依存的BS相互作用を実行する。従来の光学機器から公知のように、ビームスプリッターのユニタリー進展は、ユニタリー演算子：

40

【 数 1 】

$$U_{BS}(\theta) = e^{-i \int_0^t H_{BS}(\tau) d\tau} = e^{i\theta(a^\dagger b + ab^\dagger)} \quad (1)$$

(式中、

【 数 2 】

50

$$H_{BS}(\tau) = g(\tau)(a^\dagger b + ab^\dagger), \quad (2)$$

および

$$\theta = \int_0^t g(\tau) d\tau \quad (3)$$

)により記載される。

【0045】

= $\pi/2$ について、ビームスプリッターユニタリー演算子は、消滅演算子 a および b のそれぞれに関連する2つの空洞モードの間の状態を交換するSWAP操作を実行する。 = $\pi/4$ および = $-\pi/4$ について、ユニタリー演算子は、50/50ビームスプリッターに相当する。通常の光学機器とは異なり、マイクロ波空洞固有モードは異なる周波数を有し、非線形性なしに互いに連結されない。しかしながら、ジョセフソン非線形性およびさらなるパラメトリックポンプは、空洞周波数の差を補償するために使用され得るので、異なる周波数を有するモードはコヒーレンスに連結され得る。例えば、ジョセフソン非線形性由来の4モード連結

【数3】

$$g_4 a^\dagger b c^\dagger d + h.c.$$

(式中 $h.c.$ は第1の項のエルミート共役を表し、 g_4 は4モード連結定数である)に基づいて、モード c および d はポンピングされ得るので、該モードは、振幅 $c = A_c(\omega_c)$ および $d = A_d(\omega_d)$ を有する古典的なコヒーレンス状態により近似され得、これにより $g(\omega) = g_4 A_c^*(\omega_c) A_d(\omega_d)$ を用いて式(2)において有効なビームスプリッター連結ハミルトニアンがもたらされる。 $g(\omega)$ は、 $A_c(\omega_c)$ および $A_d(\omega_d)$ の振幅および位相を制御することにより調整され得ることに注意。この場合、いくつかの態様は、非常に高いオン/オフ比でビームスプリッター連結を容易にオン/オフし得る。これは、キュービットの間の「常時オン」の容量的連結または他の固定連結に対して明確な利点である。さらに、モード c および d をポンピングすることにより、それらの周波数の合計は空洞モード周波数の合計と等しくなり、形態

【数4】

$$H_S = f(\tau) a^\dagger b^\dagger + f^*(\tau) ab$$

の二線形連結を実現し得る。これらの2つの操作を用いて、2つの空洞間の任意の線形シンプレティック変換を実行し得る。

【0046】

いくつかの態様において、ジョセフソン非線形性を使用してユニタリービームスプリッター演算子を実行する上述のアプローチは、ジョセフソンデバイスにおける欠点に対してエラー強くなり得る。例えば、該デバイスの固有の非線形性は弱いパラメトリックポンピングが強い場合、モード c および d における熱ノイズの効果は、このノイズが大きなコヒーレンス状態振幅 A_c および A_d に対して小さいという事実により抑制され得る。この領域(regime)における操作はまた、ビームスプリッターの線形性を増加し得るので、広範囲の光子数を含む量子状態についてSWAP操作が実行され得る。

【0047】

ビームスプリッターユニタリー変換は、量子情報処理について非常に有用な要素である。例えば、ビームスプリッターユニタリー演算子により挙動を示すガウス入力状態(例えばコヒーレンス状態、スクイーズド状態)の進展は古典的コンピューターにより効果的にシミュレートされ得るが、非ガウス入力状態(例えばフォック状態)の進展は、些細でない出力状態をもたらし得る。例えば、ボゾンサンプリングの複雑さは、古典的コンピューターによりシミュレートすることが困難な出力状態の些細でない統計学的特性を示す。さらに、

単一光子供給源および光子検出器の両方と合わされたビームスプリッターユニタリーは、ゲートのもつれの見込みの性質および非常に厄介なリソースオーバーヘッド(resource overhead)を含む大きな難題を伴うが、ユニバーサル線形光学量子コンピューター計算(LOQC)を達成し得る。

【0048】

いくつかの態様において、線形光学量子コンピューター計算に限定されるのではなく、量子情報処理を容易にするためにさらなる非線形要素が使用され得る。例えば、マイクロ波光子を有する超伝導回路の物理的プラットフォームを使用することは、単一光子供給源および光子検出器の能力を提供するだけでなく、2準位または多準位アンシラとして使用され得る少なくとも1つの高度に制御可能なトランスモンを含む。いくつかの態様において、ビームスプリッターユニタリー演算子および空洞-トランスモン分散連結ゲートを合わせる量子操作は、量子情報処理操作を実行するために使用される。いくつかの態様において、分散連結ゲートは依然として、トランスモン(または他の)アンシラの量子状態により(例えば該状態に基づいておよび/または該状態に条件づけられて)制御される線形光学機器変換である。線形光学機器およびゲートに基づく量子コンピューター計算の能力のこの併合(merging)は、強力であり、特定の論理エンコードから独立した様式で光子状態において論理的にエンコードされたキュービットに対してゲート操作を実行することを可能にする。したがって、いくつかの態様において、情報の論理エンコードは、同じ操作を用いて同じハードウェアを使用しているにもかかわらず変化し得る。

【0049】

第1のアンシラデバイス141は連結デバイス131と同様であるが、両方の空洞ではなく第1の空洞111のみに連結される。第1のアンシラデバイスは、マイクロ波照射のポンプおよび読み出しパルスを用いてトランスモン144を駆動するためのポンプポート142ならびにトランスモン144からの読み出しマイクロ波信号を受信するための読み出しポート143を含む。トランスモン144は、少なくとも部分的に第1の空洞111に突出する第1のアンテナパッド145を介して第1の空洞111に連結される。第2のアンテナパッド146は、トランスモン144を準平面共振器147に連結する。

【0050】

第2のアンシラデバイス151は第1のアンシラデバイス141と同様であるが、第1の空洞111ではなく第2の空洞121のみに連結される。第2のアンシラデバイスは、マイクロ波照射のポンプおよび読み出しパルスを用いてトランスモン154を駆動するためのポンプポート152ならびにトランスモン154からの読み出しマイクロ波信号を受信するための読み出しポート153を含む。トランスモン154は、少なくとも部分的に第1の空洞111に突出する第1のアンテナパッド155を介して第1の空洞111に連結される。第2のアンテナパッド156は、トランスモン144を準平面共振器147に連結する。

【0051】

第1および第2のアンシラデバイス141および152は：

【数5】

$$\text{CPS} = |g\rangle\langle g| \otimes I + |e\rangle\langle e| \otimes (-1)^{\hat{n}} \quad (4)$$

(式中、 $\hat{n} = a^\dagger a$

はトランスモンと連結した特定の空洞のボゾンモードの数演算子である)

として表されるCPS操作を実行するために使用され得る。いくつかの態様において、光子数パリティ操作は

【数6】

$$\hat{P} = (-1)^{a^\dagger a}$$

10

20

30

40

50

であるため、位相シフトは であり、制御されたパリティ操作の実行を生じる。いくつかの態様において、CPSゲートは、持続時間 $t = \pi / \Omega$ および連結強度 J について、アンシラトランスモンとそれぞれの空洞の間の分散連結を有するハミルトニアン

【数 7】

$$H_{\text{dis}} = \hbar \chi |e\rangle\langle e| \otimes \hat{n} \quad (5)$$

下での時間進展から得られ得る。

【0052】

量子情報系110を実行するためのパラメータの例示的な組は以下のとおりである：第1の空洞111はカー $\omega_{11} = 2\text{kHz}$ および $\omega_{12} = 5.45\text{GHz}$ を有し得；第2の空洞121はカー $\omega_{21} = 3\text{kHz}$ および $\omega_{22} = 6.55\text{GHz}$ を有し得；連結デバイス131は $\omega_{13} = 74\text{MHz}$ 、 $\omega_{23} = 5.95\text{GHz}$ 、 $\omega_{c1} = 0.26\text{MHz}$ および $\omega_{c2} = 0.32\text{MHz}$ を有し得；第1のアンシラトランスモン141は $\omega_{14} = 180\text{MHz}$ 、 $\omega_{15} = 4.5\text{GHz}$ 、 $\omega_{16} = 0.76\text{MHz}$ を有し得；第2のアンシラトランスモン151は $\omega_{24} = 180\text{MHz}$ 、 $\omega_{25} = 5.0\text{GHz}$ 、 $\omega_{26} = 1.26\text{MHz}$ を有し得る。

10

【0053】

いくつかの態様において、c-SWAPゲートは、BS操作とCPS操作の組合せを使用して実行され得る。c-SWAPゲート操作は2つの空洞モードおよび1つのアンシラトランスモン上で作動し、アンシラトランスモンの状態に基づく2つの空洞の状態を交換する。そのため、ユニタリーc-SWAP演算子は：

20

【数 8】

$$U_{\text{cSWAP}} = |g\rangle\langle g| \otimes I + |e\rangle\langle e| \otimes \text{SWAP} \quad (6)$$

(式中 $|g\rangle$ および $|e\rangle$ は、アンシラトランスモンの基底状態および第1の励起状態のそれぞれを表す)として記載され得る。 $(\text{c-SWAP})^2 = I$ であるため、c-SWAPは可逆的である。c-SWAPゲートは時々、古典的コンピューター計算についてユニバーサルであるFredkinゲートと称される。量子コンピューター計算について、c-SWAPおよび単一キュービット回転は、ユニバーサルコンピューター計算を可能にする一組の量子ゲートを形成する。

30

【0054】

図2Aは、c-SWAPゲートの量子回路図200を図示する。直線201、202および203は、第1の空洞111、第2の空洞121およびアンシラトランスモン131を表す。量子回路図において、操作は、左から右へ時間の関数として、種々の構成要素に対して実行される。c-SWAPゲートについての記号は、空洞直線201および202のそれぞれで「X」、ならびにアンシラトランスモン直線203上でドットを含む。

【0055】

図2Bは、BS操作およびCPS操作を使用してc-SWAPゲートを実行するための例示的な量子回路図210を図示する。第1に、 $\theta = \pi/4$ を有する第1のBS操作211は、第1の空洞201と第2の空洞202の間で実行される。上述のように、BS操作は連結トランスモン134を使用して実行され得る。第1のBS操作211の後、アンシラトランスモン203と第2の空洞202の間でCPS操作213が実行される。最終的に、 $\theta = -\pi/4$ である第2のBS操作215は、第1の空洞201と第2の空洞202の間で実行される。

40

【0056】

図2Cに示されるように、c-SWAPゲートは、第1の光学モード231第2の光学モード232およびトランスモン232を有する従来の線形光学図に関して表され得る。該図は、第1のビームスプリッター234、第2のビームスプリッター235およびトランスモンの状態により制御される1つのアーム上で0または π 位相シフトを実行する制御位相シフト器236で構築されるマッハ-ツェンダー干渉計230である。トランスモン状態 $|g\rangle$ について、0位相シフトがあるので、2つのボゾンモードの交換はない。トランスモン状態 $|e\rangle$ について、2つ

50

の光学モード231および232の間の完全交換(SWAP)をもたらす位相シフト(トランスモンと連結されるそれぞれおよび全ての励起について)がある。そのため、いくつかの態様において、c-SWAPは、(光学モードにより運ばれる)量子信号の経路を制御するための量子状態(例えばアンシラトランスモンの状態)を使用する、特殊な量子制御ルーターとして使用され得る。

【0057】

いくつかの態様において、e-SWAP操作は、c-SWAPゲートとアンシラトランスモン回転の組合せを使用して実行され得る。e-SWAPは、2つの空洞上で作動し、ユニタリー演算子：

【数9】

$$U_{\text{eSWAP}}(\theta) = \exp[i\theta\text{SWAP}] = \cos\theta + i\sin\theta \text{SWAP} \quad (7)$$

10

により表される。

【0058】

= $\pi/2$ について、e-SWAPゲートはSWAPゲートと同等であり、ここで得られるグローバル位相シフト(i)は、オブザーバブルではない(non-observable)。

【数10】

$$U_{\text{eSWAP}}(\pi/4) = 1/\sqrt{2}(I + i\text{SWAP})$$

20

は、同一性演算子とSWAP演算子のコヒーレンス組合せであり、時々

【数11】

$$\sqrt{\text{SWAP}}$$

と示される。単一キュービット回転およびキュービット上で操作される

【数12】

$$\sqrt{\text{SWAP}}$$

演算子は、一組のユニバーサル量子ゲートを形成する。

30

【0059】

e-SWAP演算子とビームスプリッターユニタリー演算子の間に類似性および相違がある。0および1の合計励起を有するボゾンサブ空間について、2つは同等である(例えば

【数13】

$$U_{\text{BS}}(\theta)|0_a, 1_b\rangle = \cos\theta|0_a, 1_b\rangle + i\sin\theta|1_a, 0_b\rangle = U_{\text{eSWAP}}(\theta)|0_a, 1_b\rangle$$

)。しかしながら、1より大きい合計励起を有するサブ空間について、2つの演算子は異なる挙動をする(例えば

【数14】

$$U_{\text{BS}}(\theta)|1_a, 1_b\rangle = \cos 2\theta |1_a, 1_b\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} \sin 2\theta (|2_a, 0_b\rangle + |0_a, 2_b\rangle)$$

40

であり、これは $U_{\text{eSWAP}}(\theta)|1_a, 1_b\rangle = |1_a, 1_b\rangle$ とは異なる)。

【0060】

e-SWAP演算子の1つの特徴は、該演算子は任意の数のボゾンを含む単一モードボゾンエンコードに関して論理サブ空間を保存するということである。任意の単一モードボゾンエンコードの論理状態

【数15】

50

$$|\varphi_1\rangle, |\varphi_2\rangle \in \mathcal{H}_C$$

について、e-SWAP操作

【数 1 6】

$$U_{\text{eSWAP}}(\theta)|\varphi_1\rangle_a|\varphi_2\rangle_b = \cos\theta |\varphi_1\rangle_a|\varphi_2\rangle_b + i\sin\theta |\varphi_2\rangle_a|\varphi_1\rangle_b$$

は、任意のボゾンコードおよび任意のパラメーター についてのコード空間を保存する。この重要な特性は、同じハードウェアを使用したボゾンエンコードの異なる選択を用いて量子情報処理を実行することを可能にする。この強力な特徴は、ハードウェアに大きな柔軟性を与え、一定のハードウェア上の「ソフトウェアアップデート」を介した量子エラー訂正について異なるエンコードを用いた実験を可能にする。

10

【0 0 6 1】

いくつかの態様において、2つの空洞モードの間のe-SWAP演算子は、2準位アンシラトランスモンを使用して実行され得る。例えば、図3Aは第1の空洞301、第2の空洞302およびアンシラトランスモン303の間の量子回路図300である。e-SWAP操作を実行するための図示される方法は以下のとおりである：(1)アンシラトランスモン303を量子状態

【数 1 7】

$$|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$$

20

へと初期化する；(2)アンシラトランスモン303の状態に基づいて制御された第1の空洞301と第2の空洞302の間で第1のc-SWAP操作311を実行する；(3)X軸の周囲でアンシラトランスモン303を角度2 だけ回転させる312

【数 1 8】

$$X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$$

；および(4)アンシラトランスモン303の状態に基づいて制御された第1の空洞301と第2の空洞302の間で第2のc-SWAP操作313を実行する。前述の方法の後、アンシラトランスモンを初期状態 |+ まで修原し、2つの空洞モードから切り離し；一方で、2つの空洞モードは、e-SWAP操作

30

【数 1 9】

$$U_{\text{eSWAP}}(\theta)$$

を受ける。アンシラトランスモン303が測定される場合314、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 |+ である。

【0 0 6 2】

図3Bは、BS操作およびCPS操作を使用して図3Aのe-SWAP操作を実行するための量子回路図320を図示する。この例において、c-SWAPゲートは単純に、図2Bに示されるc-SWAP法と置き換えられる。したがって、e-SWAPゲートを実施する方法は：(1)アンシラトランスモン303を量子状態

40

【数 2 0】

$$|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$$

へと初期化する工程；(2)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $\pi/4$ である第1のBS操作321を実行する工程；(3)第2の空洞302とアンシラトランスモン303の間で第1のCPS操作322を実行する工程；(4)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $-\pi/4$ である第2のBS操作323を実行する工程；(5)X軸の周囲でのアンシラトランスモン303の角度

50

2 だけの回転324を実行する工程

【数 2 1】

$$X_{\theta} = e^{i\theta\sigma_x}$$

; (6)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $\theta = \pi/4$ である第3のBS操作325を実行する工程 ; (7)第2の空洞302とアンシラトランスモン303の間で第2のCPS操作326を実行する工程 ; (8)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $\theta = -\pi/4$ である第4のBS操作327を実行する工程を含む。図3Aに示されるように、アンシラトランスモン303が測定される場合328、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 $|+\rangle$ である。

【0063】

いくつかの態様において、e-SWAP演算子の簡易化されてよりエラー強さのある実行は、図2Bの量子回路図210を図3Aの量子回路図300に単純に置き換えることとは異なる方法で、c-SWAP演算子を、ビームスプリッター演算子およびCPSゲートに分解することにより得られ得る。量子回路図320の簡易化は、ビームスプリッター操作の2つが重複する(例えば第2および第3のビームスプリッター操作323および325)ことの実現化生じるが、これは2つのビームスプリッター操作は互いを相殺して除去され得るからである。さらに、トランスモンは基底状態で初期化され得、第1のCPSゲート322の直前および第2のCPSゲート326の後にさらなるアダマルゲートがトランスモンに作用するように追加され得るので、トランスモンは、ビームスプリッターユニタリー操作の間に基底状態で維持される。

【0064】

量子回路についての前述の2つの変化により、図3Cに図示されるような、e-SWAP操作のためのよりエラー強さのある量子回路図340が達成される。e-SWAPゲートを実行する方法は：(1)アンシラトランスモン303を量子状態 $|g\rangle$ へと初期化する工程；(2)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $\theta = \pi/4$ である第1のBS操作341を実行する工程；(3)アンシラトランスモン303上で第1のアダマル操作342を実行する工程；(4)第2の空洞302とアンシラトランスモン303の間で第1のCPS操作343を実行するする工程；(5)X軸の周囲でアンシラトランスモン303の角度 2θ だけの回転344を実行する工程

【数 2 2】

$$X_{\theta} = e^{i\theta\sigma_x}$$

; (6)第2の空洞302とアンシラトランスモン303の間で第2のCPS操作345を実行する工程 ; (7)アンシラトランスモン303上で第2のアダマル操作346を実行する工程 ; (8)第1の空洞301と第2の空洞302の間で $\theta = -\pi/4$ である第2のBS操作347を実行する工程を含む。アンシラトランスモン303を測定する場合348、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 $|g\rangle$ である。

【0065】

ビームスプリッター操作は他の操作と比較して比較的遅くあり得るので、簡易化された量子回路図340は、前述の変化を含む。したがって、図3Cの量子回路は、より短い合計持続時間(空洞状態において生じるエラーのリスクを低減する)およびアンシラトランスモンが励起状態にある間のより短い持続時間(アンシラ上で生じるエラーのリスクを低減する)の両方を有する。図3Aおよび3Bの量子回路設計において、トランスモンは基底状態になく、特に比較的遅いビームスプリッターユニタリー操作の間に、トランスモンは全操作を通じてデコヒーレンスに対して脆弱になる。対照的に図3Cの量子回路図340は、比較的早いアダマル、CPSおよびX ゲートの間以外はトランスモンを基底状態に保つ。そのため、いくつかの態様において、該量子回路設計は、トランスモンデコヒーレンスのための欠陥を効率的に軽減し、

【数 2 3】

$O[\gamma(t_{BS}+t_{CPS}+t_{Trans})]$ から $O[\gamma(t_{CPS} + t_{Trans})]$ まで

10

20

30

40

50

全体的な量子ゲートのエラーを低減し、ここで t_t はトランスモンデコヒーレンス速度であり、 t_{BS} 、 t_{CPS} および t_{Trans} は、ビームスプリッター、CPS およびトランスモン回転ゲート (例えば X および H) のそれぞれに関連する時間である。いくつかの態様において、

【数 2 4】

$$t_{BS}(\sim 10\mu s) \gg t_{CPS}(\sim 1\mu s) \gg t_{Trans}(\sim 10ns)$$

であり、 t_{BS} の間のトランスモンデコヒーレンスに対する脆弱性を排除することが有利になる。

【0066】

いくつかの態様において、e-SWAP 演算子は、2 より多くの空洞を超えて作動するように拡張され得る。例えば、図 4A は、

【数 2 5】

$$U_{eSWAP}^{(a,b;a',b')}(\theta) = \exp[i\theta SWAP_{a,b} SWAP_{a',b'}]$$

である 4 つの空洞を使用した e-SWAP が実行される量子回路図 400 を図示する。4 空洞 e-SWAP 法 400 は、アンシラを初期化した後に：(1) アンシラトランスモン 403 を量子状態

【数 2 6】

$$|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$$

へと初期化する工程；(2) アンシラトランスモン 403 の状態により制御される第 1 の空洞 401 と第 2 の空洞 402 の間で第 1 の c-SWAP 操作 411 を実行する工程；(3) アンシラトランスモン 403 の状態により制御される第 3 の空洞 404 と第 4 の空洞 404 の間で第 2 の c-SWAP 操作 412 を実行する工程；(4) X 軸の周囲でアンシラトランスモン 403 の角度 2θ だけの回転 415 を実行する工程

【数 2 7】

$$X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$$

；(5) アンシラトランスモン 403 の状態により制御される第 3 の空洞 404 と第 4 の空洞 404 の間で第 3 の c-SWAP 操作 413 を実行する工程；および(6) アンシラトランスモン 403 の状態により制御される第 1 の空洞 401 と第 2 の空洞 402 の間で第 4 の c-SWAP 操作 414 を実行する工程を含む。アンシラトランスモン 403 が測定される場合 415、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 $|+\rangle$ である。

【0067】

2 つのモードの間の e-SWAP についての図 3B ~ C の手順と同様に、4 つのモードについての e-SWAP 操作は、ビームスプリッター操作および CPS ゲートに分解され得 (図 4B)、よりエラー強さのある量子回路に変換され得る (図 4C)。したがって、図 4B の量子回路図 420 により図示される e-SWAP ゲートを実行する方法は：(1) アンシラトランスモン 303 を量子状態

【数 2 8】

$$|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$$

へと初期化する工程；(2) 第 1 の空洞 401 と第 2 の空洞 402 の間で $\theta = \pi/4$ である第 1 の BS 操作 421 を実行する工程；(3) 第 3 の空洞 404 と第 4 の空洞 405 の間で $\theta = \pi/4$ である第 2 の BS 操作 422 を実行する工程；(4) 第 2 の空洞 402 とアンシラトランスモン 403 の間で第 1 の CPS 操作 423 を実行する工程；(5) 第 3 の空洞 404 とアンシラトランスモン 403 の間で第 2 の CPS 操作 423 を実行する工程；(6) 第 1 の空洞 401 と第 2 の空洞 402 の間で $\theta = -\pi/4$ である第

10

20

30

40

50

3のBS操作425を実行する工程；(7)第3の空洞404と第4の空洞405の間で $\pi/4$ である第4のBS操作426を実行する工程；(8)X軸の周囲でアンシラトランスモン403の角度 2π だけの回転427を実行する工程

【数29】

$$X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$$

；(9)第1の空洞401と第2の空洞402の間で $\pi/4$ である第5のBS操作428を実行する工程；(10)第3の空洞404と第4の空洞405の間で $\pi/4$ である第6のBS操作429を実行する工程；(11)第3の空洞404とアンシラトランスモン403の間で第3のCPS操作430を実行する工程；(12)第2の空洞402とアンシラトランスモン403の間で第4のCPS操作431を実行する工程；(13)第1の空洞401と第2の空洞402の間で $\pi/4$ である第7のBS操作432を実行する工程；(7)第3の空洞404と第4の空洞405の間で $\pi/4$ である第8のBS操作433を実行する工程を含む。アンシラトランスモン403が測定される場合415、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 $|+\rangle$ である。

【0068】

全ての操作が示される順序で実行される必要があるわけではないことに注意すべきである。例えば、第1のBS操作421および第2のBS操作422は、同時に実行されるように図示される。いくつかの態様において、いずれかのBS操作は他方の操作の前に実行され得る。第3のBS操作425および第4のBS操作426；第5のBS操作428および第6のBS操作429；ならびに第7のBS操作432および第8のBS操作433についても同様である。また、第1のCPS操作423は第2のCPS操作424の前に起こると図示される。いくつかの態様において、第2のCPS操作424は第1のCPS操作423の前に実行され得る。同様に、第4のCPS操作431は、第3のCPS操作430の前に実行され得る。

【0069】

図3Cの量子回路図を簡易化し、方法をエラーに対してより強くする例に続いて、図4Cの量子回路図450は：(1)アンシラトランスモン303を量子状態 $|g\rangle$ へと初期化する工程；(2)第1の空洞401と第2の空洞402の間で $\pi/4$ である第1のBS操作451を実行する工程；(3)第3の空洞404と第4の空洞405の間で $\pi/4$ である第2のBS操作452を実行する工程；(4)アンシラトランスモン403上で第1のアダマール操作453を実行する工程；(5)第2の空洞402とアンシラトランスモン403の間で第1のCPS操作454を実行する工程；(6)第3の空洞404とアンシラトランスモン403の間で第2のCPS操作455を実行する工程；(7)X軸の周囲でアンシラトランスモン403の角度 2π だけの回転456を実行する工程

【数30】

$$X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$$

；(8)第3の空洞404とアンシラトランスモン403の間で第3のCPS操作457を実行する工程；(9)第2の空洞402とアンシラトランスモン403の間で第4のCPS操作458を実行する工程；(10)アンシラトランスモン403上で第2のアダマール操作459を実行する工程；(11)第1の空洞401と第2の空洞402の間で $\pi/4$ である第3のBS操作460を実行する工程；(12)第3の空洞404と第4の空洞405の間で $\pi/4$ である第4のBS操作461を実行する工程を含む。アンシラトランスモン403が測定される場合415、結果は、エラーがないことを仮定する初期状態 $|g\rangle$ である。

【0070】

全ての操作が示される順序で実行される必要があるわけではないことに注意すべきである。例えば、第1のBS操作451および第2のBS操作452は同時に実行されるように図示される。いくつかの態様において、いずれかのBS操作は他方の操作の前に実行され得る。第3のBS操作460および第4のBS操作461についても同様である。また、第1のCPS操作454は、第2のCPS操作455の前に生じると図示される。いくつかの態様において、第2のCPS操作455は、第1のCPS操作454の前に実行され得る。同様に第4のCPS操作458は第3のCPS操作457の前に実行され得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 1 】

ここで図3Cの量子回路図340に戻り、離調および減衰エラーの存在が議論される。

【数 3 1】

$$t_{CPS} \gg t_{Trans}$$

であるので、X の間のエラーを無視しながら、2つのCPSゲートの間のトランスモンエラーに焦点を当てる。

【 0 0 7 2 】

いくつかの態様において、図3Cに図示されるe-SWAP操作についての量子回路図340は、離調速度 で起こるトランスモン離調エラーを知らせ得る。g-eサブ空間におけるトランスモン離調エラーは、量子チャンネル

10

【数 3 2】

$$\mathcal{E}_\varphi(\rho) = (1 - \epsilon_\varphi)\rho + \epsilon_\varphi\sigma_Z\rho\sigma_Z, \quad (8)$$

により特徴付けられ得、式中、それぞれのCPSゲートの間のトランスモン離調エラーの確率について

【数 3 3】

$$\epsilon_\varphi = \frac{1}{2}(1 - e^{-\gamma_\varphi t_{CPS}})$$

20

および |g> 状態と |e> 状態の間の 相対的位相ジャンプ(relative phase jump)について

【数 3 4】

$$\sigma_Z = |g\rangle\langle g| - |e\rangle\langle e|$$

である。2つのCPSゲートのいずれかの間のトランスモン離調は、|g> に直交し、あいまいさなく検出され得る測定348でのトランスモンについて測定された |e> 状態を生じる。そのため、いくつかの態様において、CPSゲート間の任意の一次(すなわち単一出現)のトランスモン離調エラーが検出されるが、上述されるように、2つのエラーのうちいずれが生じるかは決定され得ないので、該エラーは、報告される(heralded)のみであり、訂正され得ない。

30

【 0 0 7 3 】

いくつかの態様において、基底状態 |g> および第1の励起状態 |e> を超えるさらなる準位のアンシラトランスモンは、e-SWAP操作のエラー強さを向上するために使用され得る。例えば、トランスモン状態の自発的な減衰に関連する一次のエラーは、報告および訂正の両方がされ得る。いくつかの態様において、空洞-トランスモン連結ハミルトニアンは、「エラー透明(error transparent)」に変更されるので、トランスモン減衰の主要な次数(leading order)のエラーは、空洞の全ての論理的状態についてエラー透明ハミルトニアンと交換可能である。次いで、進展の際に起こったトランスモン減衰は、進展の終わりに起こったトランスモン減衰であると同定され得、エラー分析を有意に簡易化し得る。

40

【 0 0 7 4 】

いくつかの態様において、4トランスモン準位(|g>、|r>、|r'>、|e>)が使用され、ここで |g> - |e> サブ空間は、情報のキュービットをエンコードするために使用され、|r> - |r'> サブ空間は、エラーを検出するために使用される。図5Aは、トランスモンについてのエネルギー準位図500を図示する。状態 |e> 501は、状態 |g> 502まで直接減衰しないが、主要な減衰エラーとして状態 |r> 503まで減衰するいくつかのより高い励起された準位(例えば第1の励起された状態より高い)を表す。さらなる準位を導入することにより、|g> - |e> サブ空間からのトランスモン減衰エラーは、量子チャンネル

【数 3 5】

50

$$\mathcal{E}(\rho) = \sum_{j=0,1,\dots} K_j \rho K_j^\dagger, \quad (9)$$

により特徴付けられ得、ここで

【数36】

$$K_0 = |g\rangle\langle g| + \sqrt{1 - e^{-\gamma_1 t_{CPS}}} |e\rangle\langle e| \text{ および } K_1 = e^{-\gamma_1 t_{CPS}/2} |r\rangle\langle e|$$

である。|g⟩ - |e⟩ により張られるサブ空間はキュービットをエンコードするために使用され、|e⟩、|r⟩ および |r'⟩ により張られるサブ空間は、均一な強度の空洞モードとの分散連結を有する。 10

【0075】

いくつかの態様において、図3Cに示される回路と同等の量子回路が使用されるが、ユニタリー操作は4準位トランスモンに対して一般化される。いくつかの態様において、空洞モードへの制御可能な逆作用(back-action)は、トランスモンと空洞の間の分散連結

【数37】

$$H_{\text{dis}} = \hbar\chi(|e\rangle\langle e| + |r\rangle\langle r| + |r'\rangle\langle r'|) \otimes \hat{n} \quad (10)$$

20

を、状態 |e⟩、|r⟩ および |r'⟩ について同一の分散シフトを有するように作り変えることにより制御されるので、CPSゲートは、

【数38】

$$\text{CPS} = |g\rangle\langle g| \otimes I + (|e\rangle\langle e| + |r\rangle\langle r| + |r'\rangle\langle r'|) \otimes (-1)^{\hat{n}} \quad (11)$$

である。

【0076】

いくつかの態様において、一般化されたアダマールゲートに関連するユニタリー演算子は、 30

【数39】

$$\begin{aligned} H|g\rangle &= (|g\rangle + |e\rangle)/\sqrt{2} \\ H|e\rangle &= (|g\rangle - |e\rangle)/\sqrt{2} \\ H|r\rangle &= |r\rangle \\ H|r'\rangle &= |r'\rangle \end{aligned} \quad (12)$$

となる。

【0077】

したがって、アダマール回転は、g-eサブ空間内で実行され、r-r'サブ空間にわたっては些細に働く。 40

【0078】

いくつかの態様において、トランスモン回転は、

【数40】

$$\begin{aligned} X_\theta|g\rangle &= \cos\theta|g\rangle + i\sin\theta|e\rangle \\ X_\theta|e\rangle &= i\sin\theta|g\rangle + \cos\theta|e\rangle \\ X_\theta|r\rangle &= |r'\rangle \\ X_\theta|r'\rangle &= |r\rangle \end{aligned} \quad (13)$$

となり、g-eサブ空間内で回転し、状態 |r⟩ および |r'⟩ を交換する。 50

【 0 0 7 9 】

いくつかの態様において、CPS操作は、

【数 4 1】

$$\begin{aligned} \text{CPS}|g\rangle &= |g\rangle \otimes (+1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|e\rangle &= |e\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|r\rangle &= |r\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|r'\rangle &= |r'\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

10

【 0 0 8 0 】

4準位トランスモンを超えて拡張された上記のゲートを用いて、一次トランスモン離調エラーを検出することおよび一次トランスモン減衰エラーを訂正することが可能である。

【 0 0 8 1 】

第1のCPS操作343の間のトランスモン減衰は、トランスモン状態についての $|r'\rangle$ の測定348を生じ、一方で、減衰は分散連結を変化させないので、空洞モードは、エラーなくCPSゲート下で進展し続ける。第2のCPS操作345の間のトランスモン減衰は、トランスモン状態についての $|r\rangle$ の測定を生じ、一方で、空洞モードは所望の

【数 4 2】

$$U_{e\text{SWAP}}(\theta)$$

20

として進展する。トランスモン減衰エラー(第1および第2のCPSゲートのそれぞれの間のトランスモン減衰に関連する $|r'\rangle$ および $|r\rangle$ 状態)は明白に区別され得るので、CPSゲート間の一次トランスモン減衰エラーは、いくつかの態様において積極的に訂正され得る。

【 0 0 8 2 】

いくつかの態様において、3トランスモン準位($|g\rangle$ 、 $|r\rangle$ 、 $|e\rangle$)は、 r - r' サブ空間を単一状態 $|r\rangle$ に減弱させ(collapse)、 r - r' 集合(manifold)内の操作を状態 $|r\rangle$ 上の些細な操作(例えば $X|r\rangle = |r\rangle$)に低減する(reduce)ことにより使用され得る。いくつかの態様において、かかる検出スキームはまた、トランスモン熱加熱を検出し得る(例えば $|g\rangle$ 、 $|r\rangle$)。そのため、3準位トランスモンアンシラモードは、CPSゲート間の一次トランスモン離調/減衰/加熱のエラーの検出を達成するのに十分である。

30

【 0 0 8 3 】

いくつかの態様において、トランスモンの減衰および加熱両方のエラーは、さらなるトランスモン準位を配置(deploy)することにより訂正される。例えば、図5Bのエネルギー準位図510に示される減衰遷移を有する6トランスモン準位511~516($|g\rangle$ 、 $|e\rangle$ 、 $|r\rangle$ 、 $|r'\rangle$ 、 $|s\rangle$ 、 $|s'\rangle$)および式(10)の分散連結が使用され得る。いくつかの態様において、情報のキュービットは g - e サブ空間にエンコードされる。 $|r'\rangle$ または $|r\rangle$ を生じるトランスモン状態の測定に基づいて、第1または第2のCPSゲート間のトランスモン減衰エラーを訂正し得る。 $|s'\rangle$ または $|s\rangle$ のトランスモン状態の測定に基づいて、第1または第2のCPSゲート間のトランスモン加熱エラーが訂正され得る。

40

【 0 0 8 4 】

いくつかの態様は、種々の適用において上述の技術を使用する。例えば、量子ルーター、量子RAM、量子状態比較、量子主成分分析またはユニバーサル量子コンピューター計算。

【 0 0 8 5 】

情報処理のためのモジュールアーキテクチャーにおいて、ルーターは、異なるモジュールとモジュール内の異なる構成要素との連結において不可欠な役割を担う。古典的および量子の情報処理について多くの異なる種類のルーターがある。表1に示されるように、ルーターは、入力信号および制御信号の古典的/量子(C/Q)性質に基づいて分類され得る。異

50

なる種類のルーターおよび例に関連する適用。古典的-古典的ルーターは単純に古典的なスイッチである。古典的-量子ルーターは、古典的アドレスに量子情報を送信する。量子-量子ルーターは、アドレスの量子重ね合わせに量子情報を送信する。量子-古典的ルーターは、量子アドレスに古典的情報を送信する。しかしながら、情報が古典的であるので、量子状態は減弱され、1つのアドレスのみが古典的信号を受信する。これは、半古典的「計器」が量子状態ともつれ、計器が「読まれる」場合に該状態が「減弱」する、量子測定において起こるものである。

【表 1】

制御入力	古典的	量子
古典的	C-C ルーター (例えば古典的スイッチ)	C-Q ルーター (例えば量子ネットワーク)
量子	Q-C ルーター (例えば量子測定)	Q-Q ルーター (例えば量子 RAM)

表 1

【 0 0 8 6 】

いくつかの態様において、Q-Qルーターは、(1)量子入力および制御信号を空洞およびトランスモンモードのそれぞれに保存すること、(2)トランスモンモード上で条件づけられた空洞モードに対してc-SWAP操作を適用すること、および(3)空洞モードおよびトランスモンモードから量子信号を回復させることにより、c-SWAP操作を使用して実行される。

【 0 0 8 7 】

いくつかの態様において、c-SWAP操作は、量子ランダムアクセスメモリ(RAM)を実行するために使用され得る。量子RAMは、アドレスのコヒーレンス量子重ね合わせを使用してメモリアクセスを実行し得る。効率的な量子RAMを構築するために、3準位(トランスモン)メモリ(「0」、「L」および「R」と標識される)および3つの空洞モード(「入力」、「左」および「右」と標識される)を有するQ-Qルーターを使用する。(トランスモン)メモリは、「0」状態で初期化され、全ての3つの空洞は、真空 | vac 状態で初期化される。Q-Qルーターの目的は、3つの起こり得る状態：真空 | vac 、左 | L または右 | R の重ね合わせであり得る量子信号(1つまたは複数)を処理するかまたはその経路を決定することである。

【 0 0 8 8 】

いくつかの態様において、Q-Qルーターは5つの異なる機能設定：(1)空転(idle)、(2)制御信号の記憶、(3)前方への信号の経路の決定、(4)後方への信号の経路の決定および(5)制御信号の回収を有する。工程(2)および(3)は経路を標的メモリに向かって切り開くために使用され得、工程(4)および(5)は量子RAMを切り離すための逆ユニタリーについて使用され得ることに注意。

【 0 0 8 9 】

いくつかの態様において、これらの5つの機能設定のそれぞれの操作は以下のとおりである：

- (1)Q-Qルーターが空転する場合、操作を適用する必要はない。
- (2)制御信号を記憶するために、Q-Qルーターは、入力空洞において入ってくる制御信号を記憶し、次いで入力空洞からトランスモンモードへと制御信号を転送する。
- (3)前方へと信号の経路を決定するために、Q-Qルーターは、入力空洞内で信号を一時的に記憶する。次いで、状態「0」、「L」または「R」にある(トランスモン)メモリ上で条件

づけられる場合、Q-Qルーターは、量子信号を(c-SWAP操作を介して)「入力」、「左」または「右」の空洞のそれぞれに誘導する。最終的に、Q-Qルーターは、信号を「左」および「右」の空洞から放出して、次の段階に移動させる。

(4)後方へと信号の経路を決定するために、Q-Qルーターは、(3)の逆の操作を実行する。例えば、Q-Qルーターは、入ってくる信号を「左」および「右」の空洞に記憶する。次いで、状態「0」、「L」または「R」である(トランスモン)メモリ上で条件づけられる場合、Q-Qルーターは、量子信号を(c-SWAP操作を介して)「入力」、「左」または「右」の空洞から「入力」空洞にそれぞれ誘導する。最終的に、Q-Qルーターは、入力空洞から信号を回収する。

(5)制御信号を受信するために、Q-Qルーターは、(2)の逆の操作を実行する。例えば、Q-Qルーターは、制御信号を(トランスモン)メモリから入力空洞に伝送し、次いで入力空洞から信号を回収する。

10

【0090】

いくつかの態様において、c-SWAP操作は、2つの量子状態の重複を推定するために使用され得る。例えば、トランスモンが状態 $|g\rangle + |e\rangle$ において初期され、2つのサブ系(空洞)についての量子状態が密度マトリックス ρ^A および ρ^B により表される場合、初期入力状態は：

【数43】

$$(|g\rangle + |e\rangle)(\langle g| + \langle e|) \otimes \rho^A \otimes \rho^B \quad (15)$$

20

である。

c-SWAP操作の後、状態は：

【数44】

$$\begin{aligned} & |g\rangle\langle g| \otimes \rho^A \otimes \rho^B + |g\rangle\langle e| \otimes [(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] + \\ & |e\rangle\langle g| \otimes [SWAP_{AB}(\rho^A \otimes \rho^B)] + |e\rangle\langle e| \otimes [SWAP_{AB}(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] \end{aligned} \quad (16)$$

となり、低減された密度マトリックスは、形態

【数45】

$$\rho_{\text{トランスモン}} = |g\rangle\langle g| + |g\rangle\langle e| \text{Tr} \rho^A \rho^B + |e\rangle\langle g| \text{Tr} \rho^A \rho^B + |e\rangle\langle e| \quad (17)$$

30

をとり、ここで本発明者らは、特性

【数46】

$$\begin{aligned} \text{Tr}[(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] &= \text{Tr}[(\rho_{i,j}^A \otimes \rho_{k,l}^B) \delta_{i,l} \delta_{j,k}] \\ &= \sum_{i,j} \rho_{i,j}^A \rho_{j,i}^B \\ &= \text{Tr} \rho^A \rho^B \\ &= \text{Tr} \rho^B \rho^A \end{aligned} \quad (18)$$

40

を使用した。

【0091】

したがって、いくつかの態様において、トランスモンの位相コヒーレンス(例えば Ramsey fringe contrast)を測定することにより、常に実数である重複

【数47】

$$O(\rho^A, \rho^B) \equiv \text{Tr} \rho^A \rho^B$$

50

が抽出され得る。

【0092】

いくつかの態様において、トランスモンは、 $|g\rangle + |e\rangle$ 基底で射影的に(projectively)測定される。トランスモンが $|g\rangle + |e\rangle$ として測定される場合、2つのサブ系は、対称なサブ空間(すなわちSWAP演算子についての固有値+1を有する固有サブ空間)に射影され、

【数48】

$$\rho_{A,B}^{(+)} = \Pi_+(\rho^A \otimes \rho^B) \Pi_+ \quad (19)$$

であり、ここで Π_+ は、射影演算子である。トランスモンが $|g\rangle - |e\rangle$ において測定される場合、2つのサブ系は反対称のサブ空間(すなわちSWAP演算子についての固有値-1を有する固有サブ空間)に射影され、

【数49】

$$\rho_{A,B}^{(-)} = \Pi_-(\rho^A \otimes \rho^B) \Pi_- \quad (20)$$

であり、ここで射影演算子 $\Pi_- = 1 - \Pi_+$ である。その後の測定は同じ結果を生じるはずであり、これらの測定の量子非破壊(non-demolition)性質と矛盾しない。

【0093】

いくつかの態様において、図6に図示されるような第1の空洞601、第2の空洞602およびトランスモン603上に作用するよりエラー強さのある量子回路600は、量子状態比較の目的で、以下の変更：(1)量子状態比較の目的に重要でない第2のビームスプリッター(図2B参照)の除去；(2)第1のビームスプリッター操作の間のトランスモンデコヒーレンスを回避するための $|g\rangle$ におけるトランスモンの初期化およびCPSゲートの直前の $|g\rangle + |e\rangle$ への回転を含む。簡易化された回路600は、ビームスプリッター操作の使用およびトランスモンプローブのデコヒーレンスを最小化し：(1)第1の空洞601と第2の空洞602の間の第1のビームスプリッター操作605；(2)トランスモン603上の第1のアダマール操作606；(3)第2の空洞602とトランスモン603の間のCPS操作607；(4)トランスモン603上の第2のアダマール操作608；および(5)トランスモン603状態の測定609を含む。簡易化された回路は、ビームスプリッター操作後の第2の空洞モードのパリティ測定とも解釈され得ることに注意。この解釈は、負でない(non-negative)整数 n, m を有する対称な状態

【数50】

$$(a^\dagger - b^\dagger)^{2n} (a^\dagger + b^\dagger)^m |vac\rangle$$

により張られる対称なサブ空間 Π_+ (同様に、反対称なサブ空間 Π_- は、反対称な状態

【数51】

$$(a^\dagger - b^\dagger)^{2n+1} (a^\dagger + b^\dagger)^m |vac\rangle$$

により張られる)に対する射影演算子の性質に基づいて容易に正当化され得る。50/50ビームスプリッターの後、

【数52】

$$a^\dagger \pm b^\dagger$$

が第1および第2の空洞モードの生成演算子のそれぞれに対応することが想起される。そのため、対称な状態は常に第2の空洞モードにおいて $2n$ の偶数の励起を有し、一方で反対称な状態は常に $2n+1$ の奇数の励起を有する。

【0094】

10

20

30

40

50

Aおよび Bのそれぞれについて、トランスモン測定に関係のあるバイナリーの結果0または1が得られる。 Aおよび Bの

【数 5 3】

$$N \sim \epsilon^{-2}$$

ペアは、

【数 5 4】

精度 ϵ を有する重複 $O(\rho^A, \rho^B)$

10

を忠実度高く推定することを必要とする。

【0 0 9 5】

いくつかの態様において、e-SWAP操作は、大きなデータセットからの機械学習を実行するために使用され得る量子主成分分析(qPCA)を実行するために使用される。より具体的に、qPCAは、等しく調製された密度マトリックスの集合の最大の固有値を明らかにし得る。重要な概念は、ハミルトニアンが小さな持続時間 t の間にハミルトニアン密度マトリックス $H = \dots$ であるハミルトニアン進展を効果的にシミュレートするe-SWAPの以下の特性

【数 5 5】

$$\text{Tr} \rho e^{-i\text{SWAP}\Delta t} (\rho \otimes \sigma) e^{i\text{SWAP}\Delta t} = \sigma - i\Delta t[\rho, \sigma] + O(\Delta t^2) \approx e^{-i\rho\Delta t} \sigma e^{i\rho\Delta t} \quad (21)$$

20

を使用することである。密度マトリックス の n 個の同一のコピーを用いて、

【数 5 6】

$$e^{-i\rho n\Delta t} \sigma e^{i\rho n\Delta t}$$

を構築し得る。いくつかの態様において、量子位相推定アルゴリズムと一緒に、密度マトリックス のいくつかの最大固有値と関連する位相を効率的に推定し得る。本明細書におけるいくつかの態様によるe-SWAPゲートは、qPCAの重要な工程のための物理的な実行を可能にする。

【0 0 9 6】

いくつかの態様において、e-SWAPゲートを使用して、任意の1モードボゾンエンコード (

30

【数 5 7】

$$|\tilde{0}\rangle \text{ および } |\tilde{1}\rangle$$

と示される)と矛盾のないものであり得るボゾン系を用いたユニバーサル量子コンピューター計算を達成する。例えば、4つのかかるボゾンモードを使用して1つの論理キュービットをエンコードする場合、4レール(quad-rail)論理キュービット基底は

【数 5 8】

$$\begin{aligned} |0_Q\rangle &= 1/2 (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle + |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{1,2} \otimes (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle - |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{3,4} \\ |1_Q\rangle &= 1/2 (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle - |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{1,2} \otimes (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle + |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{3,4} \end{aligned} \quad (22)$$

40

であり、ここでサブ指標は該モードを標識する。

【数 5 9】

$$|\tilde{0}\tilde{1}\rangle \pm |\tilde{1}\tilde{0}\rangle$$

はそれぞれ固有値 ± 1 を有するSWAP演算子の固有状態であるので、4レール論理Z回転は、e-SWAP操作

50

【数 6 0】

$$Z_Q(\theta) = \exp[-i\theta\text{SWAP}_{1,2}] = \exp[i\theta\text{SWAP}_{3,4}] \quad (23)$$

である。

【0097】

また、本発明者らは、

【数 6 1】

$$\text{SWAP}_{1,3} \text{SWAP}_{2,4} |0_Q\rangle = |1_Q\rangle = X_Q |0_Q\rangle$$

10

を有し、これは4ルール論理X回転が4モードe-SWAP操作

【数 6 2】

$$X_Q(\theta) = \exp[-i\theta\text{SWAP}_{1,3} \text{SWAP}_{2,4}] \quad (24)$$

であることを暗示する。

【0098】

最終的に、2つのエンコード4ルール論理キュービットの間の制御-Zゲートは、別の4モードe-SWAP操作

20

【数 6 3】

$$\text{CZ}(\theta) = \exp[-i\theta\text{SWAP}_{1,2} \text{SWAP}_{1',2'}] \quad (25)$$

であり、ここでサブ指標1'および2'は、他の4ルール論理キュービットからの第1の2つのボゾンモードを標識する。任意の論理Z-およびX-回転ならびに制御-Zゲートを考慮すれば、任意のユニバーサル量子コンピューター計算を達成することは十分である。上述のゲートは、直交する基底

【数 6 4】

$$|\tilde{0}\rangle \text{ および } |\tilde{1}\rangle$$

30

の選択の詳細に依存しないので、このスキームは、猫コード、2項式コード、GKPコード等を含む任意の1モードボゾンエンコードについて働き得る。そのため、e-SWAP実行の前述のエラー強さのある設計(図4C参照)は、ユニバーサル量子コンピューター計算についての重要な構成要素実行するのに十分である。

【0099】

本開示に記載される技術のいくつかの局面および態様がこのように記載されるが、種々の変更、改変および向上は当業者に容易であることが理解されよう。

かかる変更、改変および向上は、本明細書に記載される技術の精神および範囲内にあることが意図される。例えば、当業者は、機能を実施するためおよび/または結果および/または本明細書に記載される利点の1つ以上を得るための種々の他の手段および/または構造を容易に構想し、かかる変形および/または改変のそれぞれは本明細書に記載される態様の範囲内にあると考えられる。当業者は、常套的な実験を超えないもの、本明細書に記載される特定の態様に対する多くの同等物を使用することを認識するかまたは確かめ得る。そのため、前述の態様は、例示のみにより提示されること、ならびに添付の特許請求の範囲およびその同等物の範囲内で、具体的に記載されるもの以外の発明の態様が実施され得ることが理解されよう。また、本明細書に記載される2つ以上の特徴、系、物品、材料、キットおよび/または方法の任意の組合せは、かかる特徴、系、物品、材料、キットおよび/または方法が相互に矛盾しない場合、本開示の範囲内に含まれる。

40

50

【0100】

また、記載されるように、いくつかの局面は、1つ以上の方法として具体化され得る。方法の一部として実施される行為は、任意の適切な方法で順序づけられ得る。したがって、行為が図示されるものと異なる順序で実施される態様が構成され得、例示的な態様において連続的な行為として示されるとしても、これはいくつかの行為を同時に実施することを含み得る。

【0101】

本明細書において定義および使用される場合、全ての定義は、辞書の定義、参照により援用される文書の定義、および/または定義された用語の通常の意味を支配するものと理解されるべきである。

10

【0102】

本明細書および特許請求の範囲において使用される場合、不定冠詞「a」および「an」は、反対のことを明確に示さない限り、「少なくとも1つ」を意味すると理解されるべきである。

【0103】

本明細書および特許請求の範囲において使用される場合、句「および/または」は、そのように接続された要素、すなわちある場合において接続的に存在し、他の場合において離散的に存在する要素の「いずれかまたは両方」を意味すると理解されるべきである。「および/または」と共に列挙される複数の要素は、同じ様式、すなわちそのように接続された要素の「1つ以上」と解釈されるべきである。「および/または」節で具体的に特定された要素以外の他の要素は、具体的に特定されたこれらの要素と関連するか関連しないかのいずれにせよ、任意に存在し得る。したがって、非限定的な例として、「Aおよび/またはB」についての参照は、「含む(comprising)」などの開放型の専門用語に関連して使用される場合、一態様においてAのみ(任意にB以外の要素を含む)、別の態様においてBのみ(任意にA以外の要素を含む)、さらに別の態様においてAとBの両方(任意に他の要素を含む)などのことをいい得る。

20

【0104】

本明細書および特許請求の範囲において使用される場合、1つ以上の要素のリストに関して、句「少なくとも1つ」は、要素のリスト中のいずれか1つ以上の要素から選択されるが、要素のリスト内に具体的に列挙されるそれぞれの要素の少なくとも1つおよび全ての要素を必ずしも含むわけではなく、該要素のリストにおける要素の任意の組合せを排除しない少なくとも1つの要素を意味すると理解されるべきである。この定義はまた、具体的に特定されるこれらの要素に関係があるか関係がないかのいずれにしても、句「少なくとも1つ」が指す要素のリスト内に具体的に特定される要素以外の要素が任意に存在し得ることを可能にする。したがって、非限定的な例として、「AおよびBの少なくとも1つ」(または同等に、「AまたはBの少なくとも1つ」もしくは同等に「Aおよび/またはBの少なくとも1つ」)は、一態様において、Bが存在せずに1つより多くを任意に含む少なくとも1つのA(およびB以外の要素を任意に含む)；別の態様において、Aが存在せずに1つより多くを任意に含む少なくとも1つのB(およびA以外の要素を任意に含む)；さらに別に態様において、1つより多くを任意に含む少なくとも1つのAおよび1つより多くを任意に含む少なくとも1つのB(および他の要素を任意に含む)などのことをいい得る。

30

40

【0105】

また、本明細書で使用される語法および用語法は、説明を目的とするものであり、限定とみなされるべきではない。本明細書中の「含む(including)」、「含む(comprising)」または「有する(having)」、「含む(containing)」、「含む(involving)」およびそれらの変形の使用は、以降に列挙される項目およびそれらの同等物ならびにさらなる項目を包含することを意味する。

【0106】

特許請求の範囲および上述の明細書において、例えば「含む(comprising)」、「含む(including)」、「保有する(carrying)」、「有する(having)」、「含む(containing)」

50

、「含む(involving)」、「保持する(holding)」、「で構成される(composed of)」等の全ての移行(transitional)の句は、開放型である、すなわち含むが限定されないことを意味すると理解される。移行の句「からなる(consisting of)」および「本質的にからなる(consisting essentially of)」のみは、閉鎖型または半閉鎖型それぞれの移行の句である。

本発明の態様として以下のものが挙げられる。

項 1

第1の空洞および第2の空洞を含む複数の空洞の間で量子論理ゲートを実行するための方法であって、該方法が：

第1の空洞および第2の空洞の両方に分散的に連結される連結トランスモンを使用して、第1の空洞と第2の空洞の間で第1のビームスプリッター(BS)操作を実行する工程；ならびに

第2の空洞と、第1の空洞に分散的に連結されるのではなく第2の空洞に分散的に連結されるアンシラトランスモンとの間で制御位相シフト(CPS)操作を実行する工程を含む、方法。

10

項 2

連結トランスモンを使用して、第1の空洞と第2の空洞の間で第2のBS操作を実行する工程をさらに含む、方法であって、第1のBS操作がCPS操作の前に実行され、第2のBS操作がCPS操作の後に実行される、項 1 記載の方法。

項 3

量子論理ゲートが制御-SWAP(c-SWAP)操作を含む、項 2 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

20

項 4

量子論理ゲートが指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを含む、方法であって、該方法が：

第1の空洞と第2の空洞の間で第1のc-SWAP操作を実行する工程；

第1の空洞と第2の空洞の間で第2のc-SWAP操作を実行する工程；および

第1のc-SWAP操作と第2のc-SWAP操作の間に、アンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程

を含む、項 3 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項 5

量子論理ゲートが指数関数的-SWAP(e-SWAP)ゲートを含み、CPS操作が第1のCPS操作である、方法であって、該方法が：

第2の空洞とアンシラトランスモンの間で、第1のCPS操作の後および第2のBS操作の前に第2のCPS操作を実行する工程；ならびに

第1のCPS操作と第2のCPS操作の間に、アンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程

を含む、項 2 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

30

項 6

第1のCPS操作の前および第1のBS操作の後に第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに

第2のCPS操作の後および第2のBS操作の前に第2のアダマール操作を実行する工程をさらに含む、項 5 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

40

項 7

アンシラトランスモンを測定する工程をさらに含む、項 6 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項 8

アンシラトランスモンの測定の結果に基づいて、離調誤り離調誤りが起こったことを決定する工程をさらに含む、項 7 またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項 9

少なくとも4エネルギー準位のアンシラトランスモンが使用され；

50

第1のエネルギー準位のアンシラトランスモンが第1の減衰誤りの型に関連し；
第2のエネルギー準位のアンシラトランスモンが第2の減衰誤りの型に関連し；
該方法が、アンシラトランスモンの測定の結果に基づいて減衰誤りを訂正する工程をさらに含む、項7またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項10

CPS操作の前および/または後に、アンシラトランスモン上で少なくとも1つのローカル量子論理ゲートが実行される、項1またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項11

少なくとも1つのローカル量子論理ゲートが、BS操作の後およびCPS操作の前に実行される第1のアダマール操作を含み；

該方法が、アンシラトランスモンの状態を測定して、第1の空洞の第1の量子状態と第2の空洞の第2の量子状態を比較する工程をさらに含む、

項10またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項12

複数の空洞が、第3の空洞および第4の空洞をさらに含み；

連結トランスモンが第1の連結トランスモンであり；

アンシラトランスモンが、第4の空洞に分散的に連結されるのではなく第3の空洞に分散的に連結され；

CPS操作が第1のCPS操作であり；

該方法が；

第3の空洞および第4の空洞の両方に分散的に連結される第2の連結トランスモンを使用して、第3の空洞と第4の空洞の間で、第3のBS操作を実行する工程；ならびに

第3の空洞とアンシラトランスモンの間で第2のCPS操作を実行する工程

をさらに含む、項2またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項13

第2の連結トランスモンを使用して、第3の空洞と第4の空洞の間で、第4のBS操作を実行する工程、ここで第4のBS操作は第2のCPS操作の前に実行され、第2のBS操作は第2のCPS操作の後に実行される；

第2のCPS操作の後および第4のBS操作の前に、第3の空洞とアンシラトランスモンの間で、第3のCPS操作を実行する工程；

第2のCPS操作と第3のCPS操作の間に、アンシラトランスモン上で回転操作を実行する工程；ならびに

第3のCPS操作の後および第2のBS操作の前に、第2の空洞とアンシラトランスモンの間で、第4のCPS操作を実行する工程

をさらに含む、項12またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項14

第1のCPS操作の前および第1と第3のBS操作の後に第1のアダマール操作を実行する工程；ならびに

第4のCPS操作の後および第2と第4のBS操作の前に第2のアダマール操作を実行する工程をさらに含む、項13またはいずれか他の前述の項記載の方法。

項15

マイクロ波照射を支持するように構成される第1の空洞；

マイクロ波照射を支持するように構成される第2の空洞；

第1の空洞に分散的に連結される第1のトランスモン；

第2の空洞に分散的に連結される第2のトランスモン；

第1の空洞および第2の空洞の両方に分散的に連結される第3のトランスモン；ならびに

マイクロ波照射を第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間でビームスプリッター操作、およびトランスモン回転操作を実行し、

マイクロ波照射を第1のトランスモンおよび第2のトランスモンに適用して、第1の空洞および第2の空洞のそれぞれ上で制御位相シフト操作を実行する

10

20

30

40

50

ように構成されるマイクロ波供給源を含む、多空洞量子情報系。

項 1 6

マイクロ波供給源がさらに、マイクロ波照射を第1のトランスモンおよび第2のトランスモンに適用して、第1のトランスモンおよび第2のトランスモンのそれぞれ上で任意の回転操作を実行するように構成される、項 1 5 記載の多空洞量子情報系。

項 1 7

マイクロ波供給源がさらに、マイクロ波照射を第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で一組のユニバーサル量子ゲートを実行するように構成される、項 1 6 またはいずれか他の前述の項記載の多空洞量子情報系。

項 1 8

マイクロ波供給源がさらに、マイクロ波照射を第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で制御-SWAPゲートを実行するように構成される、項 1 5 またはいずれか他の前述の項記載の多空洞量子情報系。

項 1 9

マイクロ波供給源がさらに、マイクロ波照射を第1、第2および第3のトランスモンに適用して、第1の空洞と第2の空洞の間で指数関数的-SWAPゲートを実行するように構成される、項 1 5 またはいずれか他の前述の項記載の多空洞量子情報系。

項 2 0

マイクロ波供給源がさらに：

マイクロ波照射を第1および/または第2のトランスモンに適用して、第1および/または第2のトランスモンを測定し；

マイクロ波照射を第1、第2および/または第3のトランスモンに適用して、第1および/または第2のトランスモンの測定の結果に基づいて、量子ゲートを実行するように構成される、項 1 5 またはいずれか他の前述の項記載の多空洞量子情報系。

【図面】

【図 1】

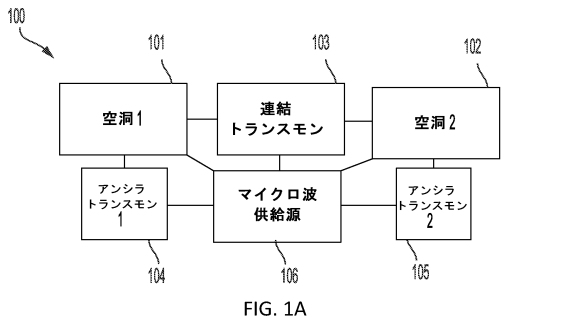


FIG. 1A

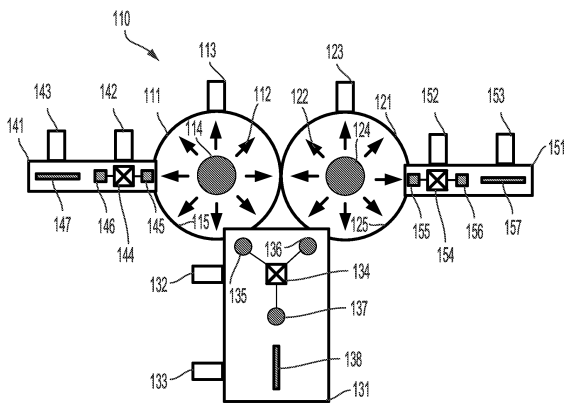


FIG. 1B

【図 2】

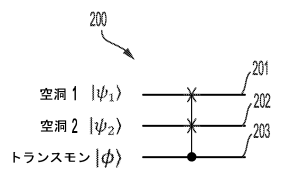


FIG. 2A

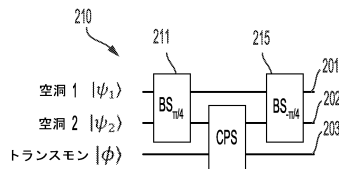


FIG. 2B

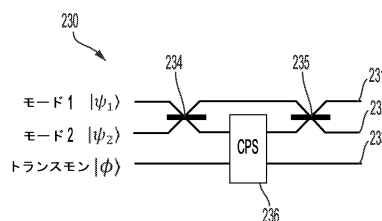


FIG. 2C

10

20

30

40

50

【 図 3 】

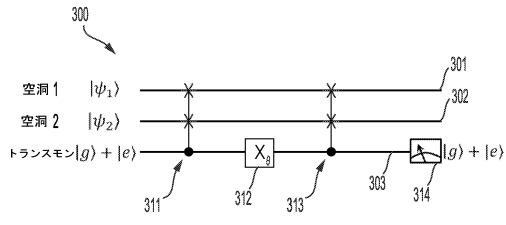


FIG. 3A

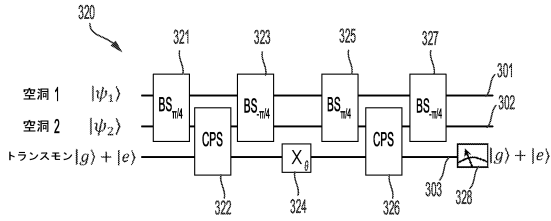


FIG. 3B

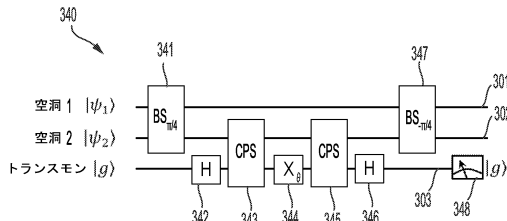


FIG. 3C

【 図 4 - 1 】

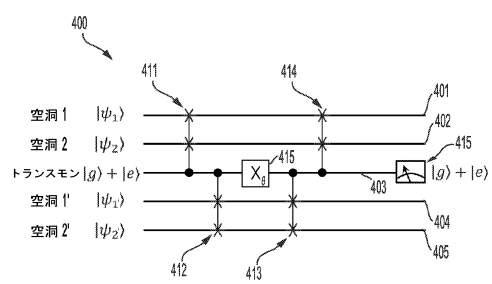


FIG. 4A

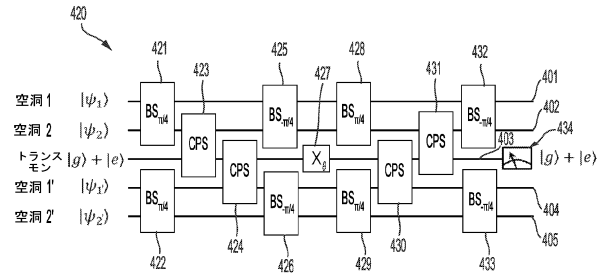


FIG. 4B

【 図 4 - 2 】

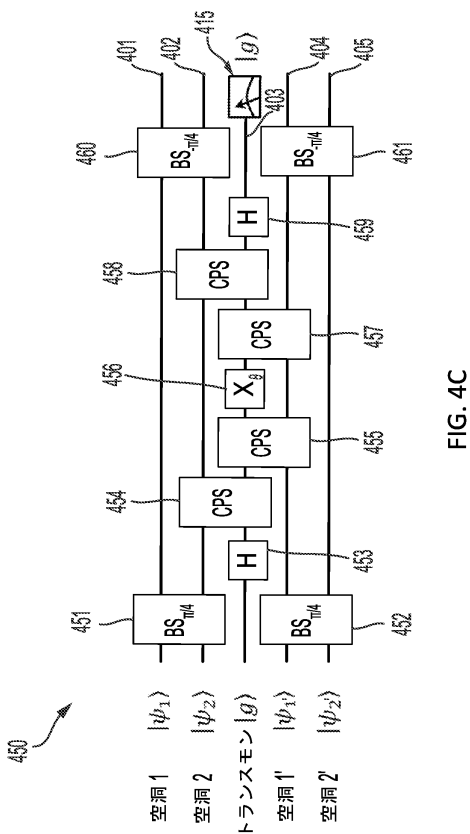


FIG. 4C

【 図 5 】

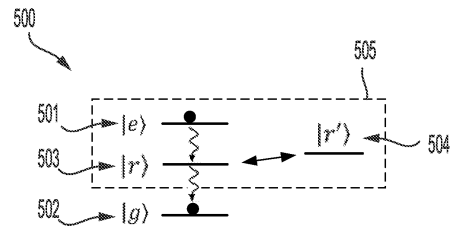


FIG. 5A

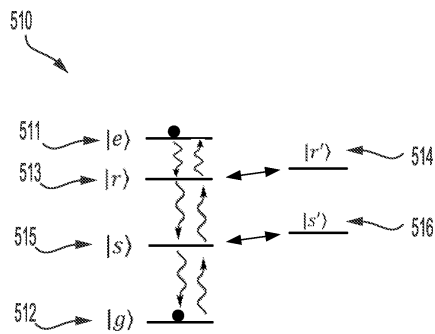


FIG. 5B

10

20

30

40

50

【 図 6 】

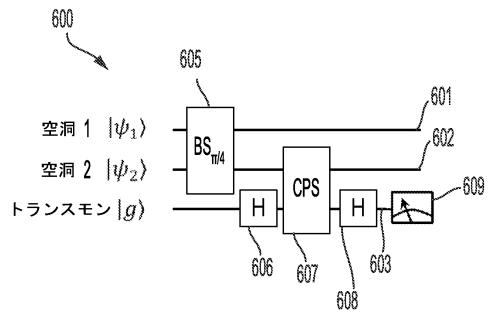


FIG. 6

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

アメリカ合衆国 コネチカット 06437 ギルフォード, ホワイト バーチ ドライブ 185

(72)発明者 ガービン, スティーブン, エム.

アメリカ合衆国 コネチカット 06517 ハムデン, ディープウッド ドライブ 30

(72)発明者 レスター, ブライアン

アメリカ合衆国 コネチカット 06511 ニュー ヘーブン, アpartment 419, ウィンチ
ェスター アベニュー 275

(72)発明者 ガオ, イボンヌ

シンガポール国 シンガポール エス380045 13-170, シムズ ドライブ 45

(72)発明者 シェールコプフ, ロバート, ジェイ., ザ サード

アメリカ合衆国 コネチカット 06443 マディソン, ノースウッド ロード 44

審査官 上田 智志

(56)参考文献

MICHAEL, Marios H. et al., New Class of Quantum Error-Correcting Codes for a Bosonic M
ode, PHYSICAL REVIEW X, 2016年07月14日, Vol. 6, pp.031006-1 - 031006-26, DOI:
10.1103/PhysRevX.6.031006

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H10N 60/10、60/12

G06N 10/00

G06F 7/38

H03K 19/195

JSTPlus / JMEDPlus / JST7580 (JDreamIII)