



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111542935 A

(43)申请公布日 2020.08.14

(21)申请号 201980007288.6

罗伯特·J·舍尔科普夫三世

(22)申请日 2019.01.05

(74)专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

(30)优先权数据

62/613,937 2018.01.05 US

62/733,326 2018.09.19 US

代理人 杜诚 杨林森

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2020.07.03

(51)Int.Cl.

H01L 39/22(2006.01)

G06N 20/00(2019.01)

H03K 19/195(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2019/012440 2019.01.05

B82Y 10/00(2011.01)

H01P 5/18(2006.01)

(87)PCT国际申请的公布数据

W02019/156759 EN 2019.08.15

(71)申请人 耶鲁大学

地址 美国康涅狄格州

(72)发明人 蒋良 史蒂文·M·格文

布里安·莱斯特 伊冯娜·高

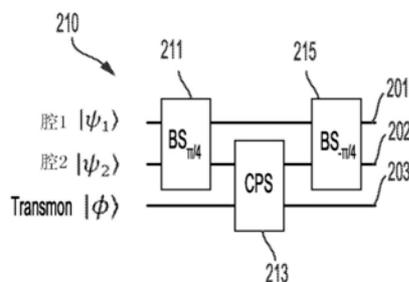
权利要求书3页 说明书17页 附图7页

(54)发明名称

鲁棒的量子逻辑门

(57)摘要

提供并描述了用于实现鲁棒的量子逻辑门的技术。在一些方面,在包括第一腔和第二腔的多个腔之间的量子逻辑门通过以下操作实现:使用色散耦合至第一腔和第二腔两者的耦合 transmon 在第一腔与第二腔之间执行第一分束器操作;以及在第二腔与色散耦合至第二腔但未色散耦合至第一腔的辅助 transmon 之间执行受控相移操作。



1. 一种用于在包括第一腔和第二腔的多个腔之间实现量子逻辑门的方法,所述方法包括:

使用色散耦合至所述第一腔和所述第二腔两者的耦合transmon在所述第一腔与所述第二腔之间执行第一分束器(BS)操作;以及

在所述第二腔与辅助transmon之间执行控制相移(CPS)操作,所述辅助transmon色散耦合至所述第二腔但并未色散耦合至所述第一腔。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括使用所述耦合transmon在所述第一腔与所述第二腔之间执行第二BS操作,其中,所述第一BS操作在所述CPS操作之前执行,并且所述第二BS操作在所述CPS操作之后执行。

3. 根据权利要求2或任一其他前述权利要求所述的方法,其中,所述量子逻辑门包括受控SWAP(c-SWAP)操作。

4. 根据权利要求3或任一其他前述权利要求所述的方法,其中,所述量子逻辑门包括指数SWAP(e-SWAP)门,并且所述方法包括:

在所述第一腔与所述第二腔之间执行第一c-SWAP操作;

在所述第一腔与所述第二腔之间执行第二c-SWAP操作;以及

在所述第一c-SWAP操作与所述第二c-SWAP操作之间对所述辅助transmon执行旋转操作。

5. 根据权利要求2或任一其他前述权利要求所述的方法,其中,所述量子逻辑门包括指数SWAP(e-SWAP)门,所述CPS操作是第一CPS操作,并且所述方法包括:

在所述第一CPS操作之后并且在所述第二BS操作之前,在所述第二腔与所述辅助transmon之间执行第二CPS操作;以及

在所述第一CPS操作与所述第二CPS操作之间对所述辅助transmon执行旋转操作。

6. 根据权利要求5或任一项其他前述权利要求所述的方法,还包括:

在所述第一CPS操作之前并且在所述第一BS操作之后执行第一哈达玛操作;以及

在所述第二CPS操作之后并且在所述第二BS操作之前执行第二哈达玛操作。

7. 根据权利要求6或任一其他前述权利要求所述的方法,还包括测量所述辅助transmon。

8. 根据权利要求7或任一其他前述权利要求所述的方法,还包括确定退相误差,所述退相误差基于测量所述辅助transmon的结果而发生。

9. 根据权利要求7或任一其他前述权利要求所述的方法,其中:

使用所述辅助transmon的至少四个能级;

所述辅助transmon的第一能级与第一衰变误差类型相关联;

所述辅助transmon的第二能级与第二衰变误差类型相关联;并且

所述方法还包括基于测量所述辅助transmon的结果来校正衰变误差。

10. 根据权利要求1或任一其他前述权利要求所述的方法,其中,在所述CPS操作之前和/或之后对所述辅助transmon执行至少一个局部量子逻辑门。

11. 根据权利要求10或任一其他前述权利要求所述的方法,其中:

所述至少一个局部量子逻辑门包括在所述BS操作之后并且在所述CPS操作之前执行的第一哈达玛操作;并且

所述方法还包括测量所述辅助transmon的状态以将所述第一腔的第一量子态与所述第二腔的第二量子态进行比较。

12. 根据权利要求2或任一其他前述权利要求所述的方法, 其中:

所述多个腔还包括第三腔和第四腔;

所述耦合transmon是第一耦合transmon;

所述辅助transmon色散耦合至所述第三腔但并未色散耦合至所述第四腔;

所述CPS操作是第一CPS操作; 并且

所述方法还包括:

使用色散耦合至所述第三腔和所述第四腔两者的第二耦合transmon在所述第三腔与所述第四腔之间执行第三BS操作; 以及

在所述第三腔与所述辅助transmon之间执行第二CPS操作。

13. 根据权利要求12或任一项其他前述权利要求所述的方法, 其中, 所述方法还包括:

使用所述第二耦合transmon在所述第三腔与所述第四腔之间执行第四BS操作, 其中, 所述第四BS操作在所述第二CPS操作之前执行, 并且所述第二BS操作在所述第二CPS操作之后执行;

在所述第二CPS操作之后并且在所述第四BS操作之前, 在所述第三腔与所述辅助transmon之间执行第三CPS操作;

在所述第二CPS操作与所述第三CPS操作之间对所述辅助transmon执行旋转操作; 以及

在所述第三CPS操作之后并且在所述第二BS操作之前, 在所述第二腔与所述辅助transmon之间执行第四CPS操作。

14. 根据权利要求13或任一其他前述权利要求所述的方法, 其中, 所述方法还包括:

在所述第一CPS操作之前并且在所述第一BS操作和所述第三BS操作之后执行第一哈达玛操作; 以及

在所述第四CPS操作之后并且在所述第二BS操作和所述第四BS操作之前执行第二哈达玛操作。

15. 一种多腔量子信息系统, 包括:

第一腔, 其被配置成支持微波辐射;

第二腔, 其被配置成支持微波辐射;

色散耦合至所述第一腔的第一transmon;

色散耦合至所述第二腔的第二transmon;

色散耦合至所述第一腔和所述第二腔两者的第三transmon; 以及

微波源, 其被配置成:

向所述第三transmon施加微波辐射以在所述第一腔与所述第二腔之间实现分束器操作以及实现transmon旋转操作, 并且

向所述第一transmon和所述第二transmon施加微波辐射以分别在所述第一腔和所述第二腔上实现受控相移操作。

16. 根据权利要求15所述的多腔量子信息系统, 其中, 所述微波源还被配置成向所述第一transmon和所述第二transmon施加微波辐射以分别在所述第一transmon和所述第二transmon上实现任意旋转操作。

17. 根据权利要求16或任一其他前述权利要求所述的多腔量子信息系统,其中,所述微波源还被配置成向所述第一transmon、所述第二transmon和所述第三transmon施加微波辐射以在所述第一腔与所述第二腔之间实现一组通用量子门。

18. 根据权利要求15或任一其他前述权利要求所述的多腔量子信息系统,其中,所述微波源还被配置成向所述第一transmon、所述第二transmon和所述第三transmon施加微波辐射以在所述第一腔与所述第二腔之间实现受控SWAP门。

19. 根据权利要求15或任一其他前述权利要求所述的多腔量子信息系统,其中,所述微波源还配置成向所述第一transmon、所述第二transmon和所述第三transmon施加微波辐射以在所述第一腔与所述第二腔之间实现指数SWAP门。

20. 根据权利要求15或任一其他前述权利要求所述的多腔量子信息系统,其中,所述微波源还被配置成:

向所述第一transmon和/或所述第二transmon施加微波辐射以测量所述第一transmon和/或所述第二transmon;并且

基于测量所述第一transmon和/或所述第二transmon的结果,向所述第一transmon、所述第二transmon和/或所述第三transmon施加微波辐射以实现量子门。

鲁棒的量子逻辑门

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请根据35 U.S.C. §119 (e) 要求于2018年1月5日提交的标题为“ROBUST QUANTUM LOGICAL GATES”的美国临时专利申请第62/613,937号和2018年9月19日提交的标题为“ROBUST QUANTUM LOGICAL GATES”的美国临时专利申请第62/733,326号的权益,这两个专利申请的全部内容均通过引用并入本文。

[0003] 联邦赞助的研究

[0004] 本发明是在美国陆军研究局授予的W911NF-14-1-0011的政府支持下做出的。政府对本发明享有一定权利。

背景技术

[0005] 量子信息处理使用量子力学现象例如能量量化、叠加和纠缠来通过不被常规信息处理利用的方式对信息进行编码和处理。例如,已知可以使用量子计算而不是经典的经典计算来更有效地解决某些计算问题。然而,为了成为可行的计算选项,量子计算需要精确控制大量量子位(称为“qubit”)以及这些量子位之间的相互作用的能力。特别地,量子位应当:具有长的相干时间、能够被单独操纵、能够与一个或更多个其他量子位相互作用以实现多量子位门、能够被有效地初始化和测量、以及能够扩展到大量的量子位。

[0006] 量子位可以由具有至少两个正交状态的任何物理量子力学系统形成。用来编码信息的系统的两个状态被称为“计算基(computational basis)”。例如,光子极化、电子自旋和核自旋是可以编码信息的两级系统,并且因此可以用作量子信息处理的量子位。量子位的不同物理实现具有不同的优点和缺点。例如,光子偏振受益于长的相干时间和简单的单量子位操纵,但是受制于不能创建简单的多量子位门。

[0007] 已经提出了使用约瑟夫逊结(Josephson junction)的不同类型的超导量子位,包括:“相量子位(phase qubit)”,其中计算基是约瑟夫逊结中库珀对(Cooper pair)的量化能量状态;“通量量子位(flux qubit)”,其中计算基是超导回路中循环电流流动的方向;以及“电荷量子位(charge qubit)”,其中计算基是超导岛上库珀对的存在或不存在。超导量子位是量子位的有利的选择,因为两个量子位之间的耦合较强,使得双量子位门相对容易实现,并且超导量子位是可扩展的,因为它们是可以使用常规的电子电路技术形成的中型部件。另外,超导量子位展现出与约瑟夫逊效应相关联的强非线性以及优异的量子相干性。所有超导量子位设计使用至少一个约瑟夫逊结作为非线性非耗散元件。

发明内容

[0008] 根据一些方面,提供了一种用于在多个腔之间实现量子逻辑门的方法,多个腔包括第一腔和第二腔,该方法包括:使用色散耦合至第一腔和第二腔两者的耦合transmon在第一腔与第二腔之间执行第一分束器(BS)操作;以及在第二腔与辅助(ancilla) transmon之间执行受控相移(CPS)操作,辅助transmon色散耦合至第二腔但并未色散耦合至第一腔。

[0009] 根据一些实施方式,该方法还包括使用耦合transmon在第一腔与第二腔之间执行

第二BS操作,其中,第一BS操作在CPS操作之前执行,并且第二BS操作在CPS操作之后执行。

[0010] 根据一些实施方式,量子逻辑门包括受控SWAP (c-SWAP) 操作。

[0011] 根据一些实施方式,量子逻辑门包括指数SWAP (e-SWAP) 门,并且该方法包括:在第一腔与第二腔之间执行第一c-SWAP操作;在第一腔与第二腔之间执行第二c-SWAP操作;以及在第一c-SWAP操作与第二c-SWAP操作之间对辅助transmon执行旋转操作。

[0012] 根据一些实施方式,量子逻辑门包括指数SWAP (e-SWAP) 门,CPS操作是第一CPS操作,并且该方法包括:在第一CPS操作之后并且在第二BS操作之前,在第二腔与辅助transmon之间执行第二CPS操作;以及在第一CPS操作与第二CPS操作之间对辅助transmon执行旋转操作。

[0013] 根据一些实施方式,该方法还包括:在第一CPS操作之前并且在第一BS操作之后执行第一哈达玛操作;以及在第二CPS操作之后并且在第二BS操作之前执行第二哈达玛操作。

[0014] 根据一些实施方式,该方法还包括测量辅助transmon。

[0015] 根据一些实施方式,该方法还包括确定退相误差,退相误差基于测量辅助transmon的结果而发生。

[0016] 根据一些实施方式,使用辅助transmon的至少四个能级;辅助transmon的第一能级与第一衰变误差类型相关联;辅助transmon的第二能级与第二衰变误差类型相关联;并且该方法还包括基于测量辅助transmon的结果校正衰变误差。

[0017] 根据一些实施方式,在CPS操作之前和/或之后对辅助transmon执行至少一个局部量子逻辑门。

[0018] 根据一些实施方式,至少一个局部量子逻辑门包括在BS操作之后并且在CPS操作之前执行的第一哈达玛操作;并且该方法还包括测量辅助transmon的状态以将第一腔的第一量子态与第二腔的第二量子态进行比较。

[0019] 根据一些实施方式,多个腔还包括第三腔和第四腔;耦合transmon是第一耦合transmon;辅助transmon色散耦合至第三腔但并未色散耦合至第四腔;CPS操作是第一CPS操作;并且该方法还包括:使用色散耦合至第三腔和第四腔两者的第二耦合transmon在第三腔与第四腔之间执行第三BS操作;以及在第三腔与辅助transmon之间执行第二CPS操作。

[0020] 根据一些实施方式,该方法还包括:使用第二耦合transmon在第三腔与第四腔之间执行第四BS操作,其中,第四BS操作在第二CPS操作之前执行,并且第二BS操作在第二CPS操作之后执行;在第二CPS操作之后并且在第四BS操作之前,在第三腔与辅助transmon之间执行第三CPS操作;在第二CPS操作与第三CPS操作之间对辅助transmon执行旋转操作;以及在第三CPS操作之后并且在第二BS操作之前,在第二腔与辅助transmon之间执行第四CPS操作。

[0021] 根据一些实施方式,该方法还包括:在第一CPS操作之前并且在第一BS操作和第三BS操作之后执行第一哈达玛操作;以及在第四CPS操作之后并且在第二BS操作和第四BS操作之前执行第二哈达玛操作。

[0022] 根据一些方面,提供了一种多腔量子信息系统,包括:第一腔,其被配置成支持微波辐射;第二腔,其被配置成支持微波辐射;色散耦合至第一腔的第一transmon;色散耦合至第二腔的第二transmon;色散耦合至第一腔和第二腔两者的第三transmon;以及微波源,其被配置成:向第三transmon施加微波辐射以在第一腔与第二腔之间实现分束器操作以及

实现transmon旋转操作,并且向第一transmon和第二transmon施加微波辐射以分别在第一腔和第二腔上实现受控相移操作。

[0023] 根据一些实施方式,微波源还被配置成向第一transmon和第二transmon施加微波辐射施加以分别在第一transmon和第二transmon上实现任意旋转操作。

[0024] 根据一些实施方式,微波源还被配置成向第一transmon、第二transmon和第三transmon施加微波辐射以在第一腔与第二腔之间实现一组通用量子门。

[0025] 根据一些实施方式,微波源还被配置成向第一transmon、第二transmon和第三transmon施加微波辐射以在第一腔与第二腔之间实现受控SWAP门。

[0026] 根据一些实施方式,微波源还被配置成向第一transmon、第二transmon和第三transmon施加微波辐射以在第一腔与第二腔之间实现指数SWAP门。

[0027] 根据一些实施方式,微波源还被配置成:向第一transmon和/或第二transmon施加微波辐射以测量第一transmon和/或第二transmon;并且基于测量第一transmon和/或第二transmon的结果,向第一transmon、第二transmon和/或第三transmon施加微波辐射以实现量子门。

附图说明

[0028] 将参照以下附图来描述所公开的技术的各个方面和实施方式。应当理解,附图不一定按比例绘制。

[0029] 图1A是根据一些实施方式的多腔量子信息系统的示意图;

[0030] 图1B是根据一些实施方式的图1A的多腔量子信息系统的示例腔和transmon的示意图;

[0031] 图2A示出了根据一些实施方式的受控SWAP (c-SWAP) 门;

[0032] 图2B示出了根据一些实施方式的实现图2A的c-SWAP门的方法;

[0033] 图2C示出了根据一些实施方式的基于线性光学的c-SWAP门的示意图;

[0034] 图3A示出了根据一些实施方式的两个腔之间的指数SWAP (e-SWAP) 门;

[0035] 图3B示出了根据一些实施方式的用于实现图3A的e-SWAP门的方法;

[0036] 图3C示出了根据一些实施方式的用于实现图3A的e-SWAP门的方法;

[0037] 图4A示出了根据一些实施方式的四个腔之间的指数SWAP (e-SWAP) 门;

[0038] 图4B示出了根据一些实施方式的用于实现图4A的e-SWAP门的方法;

[0039] 图4C示出了根据一些实施方式的用于实现图4A的e-SWAP门的方法;

[0040] 图5A示出了根据一些实施方式的四级transmon能量结构;以及

[0041] 图5B示出了根据一些实施方式的六级transmon能量结构;以及

[0042] 图6示出了根据一些实施方式的执行量子态比较的方法。

具体实施方式

[0043] 在利用超导电路进行量子信息处理的常规方法中,信息被存储在基于约瑟夫逊结的量子位(例如,transmon)中,这些量子位经由总线谐振器中微波光子的交换或者经由直接电容耦合而耦合在一起。发明人已经认识并理解,其中以高Q谐振器的微波光子态存储和操纵量子信息并且具有充当辅助的transmon以提供光子量子位的通用量子控制的不同且

互补的架构相对于常规方法具有显著优点。首先,微波腔的相干时间比超导量子位的相干时间长。例如,在铝中,三维超导微波腔可以实现接近109的极高的品质因数,而且在铌中仍然较高,并且铝腔的腔相干时间超过transmon的相干时间两个数量级。其次,与在超导量子位中相比,在微波腔中信息能够被编码成的状态的数量较大。例如,腔模式的较高的激发能级扩展了可用的希尔伯特空间(Hilbert space),使得能够以与量子误差校正兼容的方式使用单腔模编码信息的量子位以针对各种缺陷,所述缺陷包括腔退相(cavity dephasing)、激发损耗或热加热(thermal heating)。

[0044] 发明人认识并意识到,这些使用微波腔的优点可以用于以下进行量子信息处理的独特方法——将量子信息存储为微波腔的量子态同时使用transmon作为辅助以协助量子信息处理和量子误差校正。这种“光子量子位”方法与常规方法相反,在常规方法中,量子信息被存储在transmon中,并且使用微波光子模式作为量子总线来耦合transmon。产生的超导电- transmon系统实现了由transmon控制器协助的腔之间的确定性耦合门、对于腔模式的通用量子控制、达到平衡点的量子误差校正、以及对于两个腔的联合宇称测量。

[0045] 发明人还认识并意识到,由于在腔-transmon耦合期间的transmon退相干,超导电- transmon系统可能遇到量子操作的有限保真度。发明人已经认识并意识到,除了通过实验改进transmon的相干特性之外,可以通过实现用于抑制或者甚至主动校正由于其他约瑟夫逊非线性器件和transmon的退相干导致的误差的鲁棒的方法来改进量子操作的保真度。

[0046] 发明人还认识并意识到,量子逻辑门的通用集合是“编码无关的(encoding agnostic)”,意味着无论选择如何以腔的量子态对量子信息进行逻辑编码(例如,cat态编码、相干态编码、Fock态编码等),量子逻辑门的集合都保持通用。此外,用于实现量子逻辑门的通用集合的硬件始终不变,与所选择的编码方案无关。

[0047] 根据一些实施方式,使用诸如transmon的一个或更多个约瑟夫逊非线性器件来控制多个微波腔和/或将多个微波腔耦合在一起。在一些实施方式中,使用耦合transmon在两个腔之间执行操作。这种操作的示例包括将第一腔的量子态耦合至第二腔的量子态的分束器(BS)操作以及将第二腔的量子态耦合至第一腔的量子态的分束器(BS)操作。这些操作被称为分束器操作是因为它们与线性光学量子计算(LOQC)方案中的分束器作用相同并且实现与分束器所做的同样的幺正操作。

[0048] 在一些实施方式中,使用耦合至单个腔的辅助transmon来实现单个腔与辅助transmon之间的受控相移(CPS)操作。在一些实施方式中,也可以控制辅助transmon以实现辅助transmon本身的量子态的旋转。

[0049] 发明人已经认识并意识到BS操作、CPS操作和辅助transmon的旋转足以实现基于通用门的量子计算。在一些实施方式中,上述操作被用于实现c-SWAP门和/或e-SWAP门。e-SWAP门耦合腔模式同时保留玻色子编码空间。这样,能够与所使用的逻辑编码无关地实现玻色子模式之间的纠缠操作。一些实施方式利用能够预示由于transmon退相干导致的缺陷的鲁棒的e-SWAP门设计。一些实施方式将c-SWAP和e-SWAP门用于一个或更多个应用,例如量子路由器、量子随机存取存储器(RAM)、量子主成分分析和基于门的通用量子计算。

[0050] 注意,虽然在本文中描述了transmon超导量子位作为多个实施方式的部件,但是在一些实施方式中也可以使用其他类型的超导器件。

[0051] 图1是根据一些实施方式的多腔量子信息系统100的示意图。多腔量子信息系统100包括第一腔101、第二腔102、耦合transmon103、第一辅助transmon 104、第二辅助transmon 105和微波源106。虽然在图1的示例系统100中仅示出了两个腔和两个辅助transmon,但是其他实施方式可以包括另外的腔和transmon。

[0052] 第一腔101和第二腔102可以是支持微波辐射的量子态的任何类型的腔。例如,在一些实施方式中,第一腔101和第二腔102可以是传输线谐振器或由诸如铝的超导材料形成的三维腔。

[0053] 耦合transmon 103可以是色散耦合至第一腔101和第二腔102两者的transmon。耦合transmon 103提供这两个腔的量子态之间的相互作用,允许在第一腔101与第二腔102之间执行诸如BS相互作用的相互作用。

[0054] 第一辅助transmon 104和第二辅助transmon 105分别色散耦合至第一腔101和第二腔102。每个辅助transmon耦合至系统100的单个腔而不耦合至用于存储量子信息的任何其他腔。辅助transmon 104和105能够被控制以实现transmon 104和105本身的量子态的旋转。另外,辅助transmon104和105能够被控制以分别与所关联的腔101和102相互作用以实现受控的相互作用例如CPS相互作用。

[0055] 微波源106可以耦合至第一腔101、第二腔102、第一辅助transmon104、第二辅助transmon 105和耦合transmon 103。微波源106与其他部件之间的耦合为微波源提供了将微波辐射施加到多腔量子信息系统100的每个部件的方式。在一些实施方式中,微波源106可以电容耦合至每个部件。

[0056] 图1B是根据一些实施方式的可以起到图1A的多腔量子信息系统100的作用的特定示例系统110的示意图(为了简单起见未示出微波源106)。系统110包括第一三维(3D)腔111、第二3D腔121、耦合器件131、第一辅助器件141以及第二辅助器件151。

[0057] 第一3D腔111和第二3D腔112分别用作中心stub 114与外壁115之间以及中心stub 124与外壁125之间的 $\lambda/4$ 传输线谐振器的3D版本。例如,中心stub 114和124的直径可以是3.2mm,并且外壁115和125的直径可以是9.5mm。然而注意,实施方式不限于任何特定的尺寸。腔101和102中的每一个的谐振频率可以由其各自的腔内的中心stub 114和124的高度来确定。例如,中心stub 114可以具有4.8mm的高度,并且第二中心stub 124可以具有5.6mm的高度。第一3D腔111支持第一频率的微波辐射112,并且第二3D腔121支持与第一频率不同的第二频率的微波辐射122。在一些实施方式中,第一腔111和第二腔121分别包括端口113和123,可以通过这些端口施加来自微波源106的微波辐射。向腔施加微波辐射例如可以实现对腔的量子态的位移操作。

[0058] 耦合器件131包括耦合transmon 134,耦合transmon 134提供第一腔111与第二腔121之间的非线性相互作用。transmon 134耦合至至少部分地插入第一腔111的第一天线135和至少部分地插入第二腔121的第二天线136,使得每个天线的至少一部分突出到其相应腔中。第一天线135和第二天线136例如可以是分别提供到第一腔111和第二腔121的电容耦合的圆形垫。

[0059] 耦合器件131还包括谐振器138,谐振器138提供读出transmon 134的状态的能力。第三天线137将谐振器138耦合至谐振器138。在一些实施方式中,谐振器138是与第一腔111或第二腔121相比具有较低Q值的准平面谐振器。在一些实施方式中,在单个蓝宝石衬底上

制造transmon 134和谐振器134。微波辐射的读出脉冲可以被泵端口132接收,并且可以从读出端口133接收产生的微波信号。

[0060] 耦合器件131的transmon 134的非线性使得能够进行四波混频,这用于在第一腔111与第二腔121之间执行变频双线性耦合。通过用满足频率匹配条件 $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{p2} - \omega_{p1}$ 的微波辐射经由泵端口132泵送transmon 134来控制四波混频,其中 ω_1 是第一腔111的谐振频率, ω_2 是第二腔121的谐振频率, ω_{p1} 是与模式c相关联的第一泵的频率,并且 ω_{p2} 是与模式d相关联的第二泵的频率。该耦合实现腔模式之间的有效的依赖于时间的BS相互作用。如根据常规光学已知的,分束器的么正演化由么正算符描述:

$$[0061] \quad U_{BS}(\theta) = e^{-i \int_0^t H_{BS}(\tau) d\tau} = e^{i\theta(a^\dagger b + ab^\dagger)} \quad (1)$$

[0062] 其中

$$[0063] \quad H_{BS}(\tau) = g(\tau)(a^\dagger b + ab^\dagger) \quad (2)$$

[0064] 以及

$$[0065] \quad \theta = \int_0^t g(\tau) d\tau \quad (3)$$

[0066] 对于 $\theta = \pi/2$,分束器么正算符实施SWAP操作,SWAP操作交换分别与湮灭算符a和b相关联的两个腔模式之间的状态。对于 $\theta = \pi/4$ 和 $\theta = -\pi/4$,么正算符对应于50/50分束器。与普通光学不同,微波腔本征模具有不同的频率,并且在不具有非线性的情况下不彼此耦合。但是,可以使用约瑟夫逊非线性和附加的参量泵来补偿腔频率差,使得可以相干地耦合具有不同频率的模式。例如,基于来自约瑟夫逊非线性的四模耦合 $g_4 a^\dagger b c^\dagger d + h.c.$ (其中h.c.表示第一项的厄米共轭,并且 g_4 是四模耦合常数),可以泵送模c和模d使得可以由幅度 $\langle c \rangle = A_c(\tau)$ 和 $\langle d \rangle = A_d(\tau)$ 的经典相干态来近似估计模c和模d,这得到式(2)中的有效分束器耦合哈密顿量,其中 $g(\tau) = g_4 A_c^*(\tau) A_d(\tau)$ 。注意,可以通过控制 $A_c(\tau)$ 和 $A_d(\tau)$ 的幅度和相位来调谐 $g(\tau)$ 。以这种方式,一些实施方式可以容易地以极高的开/关比接通/断开分束器耦合。这是相对于量子位之间的“始终接通的”电容耦合或其他固定耦合的明显优点。另外,通过泵送模式c和d使得它们的频率之和等于腔模式频率之和,可以实现 $H_S = f(\tau) a^\dagger b^\dagger + f^*(\tau) ab$ 形式的双线性耦合。利用这两个操作,可以执行两个腔之间的任何线性辛变换。

[0067] 在一些实施方式中,可以使利用约瑟夫逊非线性来实现么正分束器算符的上述方法对于约瑟夫逊器件中的缺陷具有鲁棒性。例如,如果器件的固有非线性弱但是参数泵送强,则可以通过模式c和d中的热噪声相对于大的相干态幅度 A_c 和 A_d 而言较小这一事实来抑制该噪声的影响。在这种机制下的操作还可以增加分束器的线性,使得可以针对包含宽范围的光子数的量子态执行SWAP操作。

[0068] 分束器么正变换是对于量子信息处理非常有用的元素。例如,虽然用经典计算机可以有效地模拟分束器么正算符所作用的高斯输入状态(例如相干态、挤压态)的演化,但是非高斯输入状态(例如Fock态)的演化也可能导致非平凡输出状态。例如,玻色采样的复杂度示出了难以用经典计算机模拟的输出状态的非平凡统计特性。此外,结合有单光子源和光子探测器两者的分束器单元可以实现通用线性光量子计算(LOQC),尽管存在的主要挑战包括纠缠门的概率性质和极其可怕的资源开销。

[0069] 在一些实施方式中,并不局限于线性光量子计算,而是可以使用另外的非线性元素来促进量子信息处理。例如,使用具有微波光子的超导电路的物理平台不仅提供单光子源和光子检测器的功能,而且还包括可以用作两级或多级辅助的至少一个高度可控的 transmon。在一些实施方式中,使用将分束器么正算符和腔-transmon色散耦合门进行组合的量子操作来执行量子信息处理操作。在一些实施方式中,色散耦合门仍然是受transmon (或其他) 辅助的量子态控制(例如,以之为基础和/或条件)的线性光学变换。这种对于线性光学和基于门的量子计算的能力的合并是强大的,并且允许以独立于特定逻辑编码的方式对被逻辑编码为光子态的量子位执行门操作。因此,在一些实施方式中,可以在使用具有相同操作的不同硬件时改变信息的逻辑编码。

[0070] 第一辅助器件141类似于耦合器件131,但是仅耦合至第一腔111而不是两个腔。第一辅助器件包括用于利用微波辐射的读出脉冲和泵送来驱动transmon 144的泵送端口142和用于接收来自transmon 144的读出微波信号的读出端口143。transmon 144经由至少部分地突出到第一腔111中的第一天线垫145耦合至第一腔111。第二天线垫146将transmon 144耦合至准平面谐振器147。

[0071] 第二辅助器件151类似于第一辅助器件141,但是仅耦合至第二腔121而不耦合至第一腔111。第二辅助器件包括用于利用微波辐射的读出脉冲和泵送来驱动transmon 154的泵送端口152和用于接收来自transmon 154的读出微波信号的读出端口153。transmon 154经由至少部分地突出到第一腔111中的第一天线垫155耦合至第一腔111。第二天线垫156将transmon 144耦合至准平面谐振器147。

[0072] 第一辅助器件141和第二辅助器件152可以用来实施CPS操作,其被表示为:

$$[0073] \quad \text{CPS} = |g\rangle\langle g| \otimes I + |e\rangle\langle e| \otimes (-1)^{\hat{n}} \quad (4)$$

[0074] 其中 $\hat{n} = a^\dagger a$ 是与transmon耦合的特定腔的玻色子模式的数字算符。在一些实施方式中,相移为 π ,且由于光子数字称操作是 $\hat{P} = (-1)^{a^\dagger a}$,因此使得实现受控宇称操作。在一些实施方式中,对于持续时间 $t = \pi/x$ 和耦合强度 x ,可以通过在辅助transmon与相应腔之间的色散耦合的哈密顿量下的时间演化获得CPS门,该哈密顿量被表示为:

$$[0075] \quad H_{\text{dis}} = \hbar\chi |e\rangle\langle e| \otimes \hat{n} \quad (5)$$

[0076] 用于实现量子信息系统110的示例参数集如下:第一腔111可以具有 $kerr/2\pi = 2\text{KHz}$ 和 $\omega_1/2\pi = 5.45\text{GHz}$;第二腔121可以具有 $kerr/2\pi = 3\text{KHz}$ 和 $\omega_2/2\pi = 6.55\text{GHz}$;耦合器件131可以具有 $\alpha/2\pi = 74\text{MHz}$ 、 $\omega/2\pi = 5.95\text{GHz}$ 、 $x_{c1}/2\pi = 0.26\text{MHz}$ 和 $x_{c2}/2\pi = 0.32\text{MHz}$;第一辅助transmon 141可以具有 $\alpha/2\pi = 180\text{MHz}$ 、 $\omega/2\pi = 4.5\text{GHz}$ 、 $x/2\pi = 0.76\text{MHz}$;并且第二辅助transmon 151可以具有 $\alpha/2\pi = 180\text{MHz}$ 、 $\omega/2\pi = 5.0\text{GHz}$ 、 $x/2\pi = 1.26\text{MHz}$ 。

[0077] 在一些实施方式中,可以使用BS操作和CPS操作的组合来实现c-SWAP门。c-SWAP门对辅助transmon之一和两个腔模式操作,基于辅助transmon的状态交换两个腔的状态。因此,么正c-SWAP算符可以写为:

$$[0078] \quad U_{\text{cSWAP}} = |g\rangle\langle g| \otimes I + |e\rangle\langle e| \otimes \text{SWAP} \quad (6)$$

[0079] 其中, $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 分别表示辅助transmon的基态和第一激发态。因为 $(\text{c-SWAP})^2 = I$,所以c-SWAP是可逆的。c-SWAP门有时被称为弗里德金(Fredkin)门,其对于经典计算是通用

的。对于量子计算,c-SWAP和单量子位旋转形成能够进行通用计算的一组量子门。

[0080] 图2A示出了c-SWAP门的量子电路图200。线201、线202和线203表示第一腔111、第二腔121和辅助transmon 131。在量子电路图中,从左到右根据时间对各种部件执行操作。c-SWAP门的符号包括每个腔线201和202处的“X”和辅助transmon线203上的点。

[0081] 图2B示出了用于使用BS操作和CPS操作实现c-SWAP门的示例量子电路图210。首先,在第一腔201与第二腔202之间执行第一BS操作211,其中 $\theta = \pi/4$ 。如上所述,可以使用耦合transmon 134来执行BS操作。在第一BS操作211之后,在辅助transmon 203与第二腔202之间执行CPS操作213。最后,在第一腔201与第二腔202之间执行第二BS操作215,其中 $\theta = -\pi/4$ 。

[0082] 如图2C所示,C-SWAP门可以用传统的线性光学图来表示,图中有第一光学模式231、第二光学模式232和transmon 232。该图是由第一分束器234、第二分束器235和受控移相器236构成的马赫-曾德干涉仪230,受控移相器在由transmon的状态控制的一个臂上实现0或 π 相移。对于transmon状态 $|g\rangle$,存在0相移,并且因此两个玻色子模式不交换。对于transmon状态 $|e\rangle$,存在 π 相移(对于与transmon耦合的每个和每一个激发),引起两个光模式231与232之间的完全交换(SWAP)。因此,在一些实施方式中,c-SWAP可以用作特殊的量子控制路由器,其使用量子态(例如辅助transmon的状态)来控制量子信号(由光模式承载)的路径。

[0083] 在一些实施方式中,可以使用c-SWAP门和辅助transmon旋转的组合来执行e-SWAP操作。e-SWAP对两个腔进行操作,并且由么正算符表示:

$$[0084] \quad U_{eSWAP}(\theta) = \exp[i\theta SWAP] = \cos\theta + i\sin\theta SWAP \quad (7)$$

[0085] 对于 $\theta = \pi/2$,e-SWAP门等效于SWAP门,在这种情况下产生的全局相移(i)是不可观察的。对于 $\theta = \pi/4$, $U_{eSWAP}(\pi/4) = 1/\sqrt{2}(I + iSWAP)$ 是身份算符和SWAP算符的相干组合,并且有时被表示为 \sqrt{SWAP} 。对量子位进行的单量子位旋转和 \sqrt{SWAP} 算符形成一组通用的量子门。

[0086] e-SWAP算符与分束器么正算符之间存在相似性和差异。对于具有零和一总激发的玻色子子空间,这两个算符是等效的(例如 $U_{BS}(\theta) |0_a, 1_b\rangle = \cos\theta |0_a, 1_b\rangle + i\sin\theta |1_a, 0_b\rangle = U_{eSWAP}(\theta) |0_a, 1_b\rangle$)。然而,对于具有多于一总激发的子空间,这两个算符表现不同(例如,

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

[0087] e-SWAP算符的一个特征是它保留了针对包含任意数量的玻色子的单模玻色子编码的逻辑子空间。对于任意单模玻色子编码的逻辑状态 $|\varphi_1\rangle, |\varphi_2\rangle \in \mathcal{H}_C$, e-SWAP操作 $U_{eSWAP}(\theta) |\varphi_1\rangle_a |\varphi_2\rangle_b = \cos\theta |\varphi_1\rangle_a |\varphi_2\rangle_b + i\sin\theta |\varphi_2\rangle_a |\varphi_1\rangle_b$ 保留了用于任何玻色子码和任何参数 θ 的码空间。这个重要的特性使得能够使用同一硬件通过对玻色子编码的不同选择来执行量子信息处理。这个强大的特征为硬件提供了很大的灵活性,并且允许利用经由固定硬件上的“软件更新”实现的用于量子误差校正的不同编码来进行实验。

[0088] 在一些实施方式中,两个腔模式之间的e-SWAP算符可以使用两级辅助transmon实现。例如,图3A是第一腔301、第二腔302与辅助transmon 303之间的量子电路图300。所示出

的用于实现e-SWAP操作的方法如下：(1) 将辅助transmon 303初始化至量子态 $|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$ ；(2) 执行基于辅助transmon 303的状态而被控制的、第一腔301与第二腔302之间的第一c-SWAP操作311；(3) 使辅助transmon 303绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转312角度 2θ ；以及(4) 执行基于辅助transmon 303的状态而被控制的、第一腔301与第二腔302之间的第二c-SWAP操作313。在上述方法之后，使辅助transmon恢复到初始状态 $|+\rangle$ 并且与两个腔模式去耦合；同时，两个腔模式经历e-SWAP操作， $U_{\text{eSWAP}}(\theta)$ 。如果对辅助transmon 303进行测量314，假设没有误差，则结果是初始状态 $|+\rangle$ 。

[0089] 图3B示出了用于使用BS操作和CPS操作来实现图3A的e-SWAP操作的量子电路图320。在这个示例中，简单地用图2B所示的c-SWAP方法代替c-SWAP门。因此，实现e-SWAP门的方法包括：(1) 将辅助transmon 303初始化至量子态 $|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$ ；(2) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第一BS操作321；(3) 在第二腔302与辅助transmon 303之间执行第一CPS操作322；(4) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第二BS操作323；(5) 对辅助transmon 303执行绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转324角度 2θ ；(6) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第三BS操作325；(7) 在第二腔302与辅助transmon 303之间执行第二CPS操作326；(8) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第四BS操作327。如图3A所示，如果对辅助transmon 303进行测量328，假设没有误差，则结果是初始状态 $|+\rangle$ 。

[0090] 在一些实施方式中，可以通过以不同于将图2B的量子电路图210简单地代入图3A的量子电路图300的方式将c-SWAP算符分解成分束器算符和CPS门来获得e-SWAP算符的简化和更鲁棒的实现。量子电路图320的简化来自以下认识：分束器操作中有两个由于其彼此抵消因而是冗余的（例如，第二分束器操作323和第三分束器操作325），因此可以被去除。另外，可以将transmon初始化为基态，并且可以添加另外的哈达玛门以正好在第一CPS门322之前并且第二CPS门326之后作用于transmon，使得在分束器么正操作期间将transmon保持在基态。

[0091] 通过对量子电路的上述两个改变，实现了用于e-SWAP操作的更鲁棒的量子电路图340，如图3C所示。实现该e-SWAP门的方法包括：(1) 将辅助transmon 303初始化为量子态 $|g\rangle$ ；(2) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第一BS操作341；(3) 对辅助transmon 303执行第一哈达玛操作342；(4) 在第二腔302与辅助transmon 303之间执行第一CPS操作343；(5) 执行使辅助transmon 303绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转344角度 2θ ；(6) 在第二腔302与辅助transmon 303之间执行第二CPS操作345；(7) 对辅助transmon 303执行第二哈达玛操作346；(8) 在第一腔301与第二腔302之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第二BS操作347。如果对辅助transmon 303进行测量348，假设没有误差，则结果为初始状态 $|g\rangle$ 。

[0092] 简化的量子电路图340包括上述变化，因为分束器操作与其他操作相比可能相对慢。因此，图3C中的量子电路具有较短的总持续时间（其降低了在腔状态中发生误差的风险）和其中辅助transmon处于激发态的时段的较短持续时间（其降低了在辅助上发生误差的风险）两者。在图3A和图3B的量子电路设计中，transmon从不处于基态，使得transmon在整个操作中、尤其是在相对慢的分束器么正操作期间易受到退相干的影响。相比之下，图3C的量子电路图340使得transmon在相对快的哈达玛门、CPS门和 X_θ 门期间之外保持基态。因此，在一些实施方式中，该量子电路设计有效地减轻了由于transmon退相干引起的缺陷，从

而使整个量子门的误差从 $0[\gamma_t(t_{BS}+t_{CPS}+t_{Trans})]$ 减小到 $0[\gamma_t(t_{CPS}+t_{Trans})]$,其中, γ_t 是transmon退相干率, t_{BS} 、 t_{CPS} 和 t_{Trans} 分别是与分束器门、CPS门和transmon旋转门(例如 X_θ 和H)相关联的时间。在一些实施方式中, $t_{BS}(\sim 10\mu s) \gg t_{CPS}(\sim 1\mu s) \gg t_{Trans}(\sim 10ns)$,因而使得有利于消除 t_{BS} 期间transmon退相干的弱点。

[0093] 在一些实施方式中,e-SWAP算符可以被扩展以对两个以上的腔进行操作。例如,图4A示出了使用四个腔通过 $U_{eSWAP}^{(a,b;a',b')}(\theta) = \exp[i\theta SWAP_{a,b} SWAP_{a',b'}]$ 执行e-SWAP的量子电路图400。该四腔e-SWAP方法400包括在将辅助初始化之后:进行以下操作(1)将辅助transmon 403初始化至量子态 $|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$; (2)执行受辅助transmon 403的状态控制的、第一腔401与第二腔402之间的第一c-SWAP操作411; (3)执行受辅助transmon 403的状态控制的、第三腔404与第四腔404之间的第二c-SWAP操作412; (4)执行使辅助transmon 403绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转415角度 2θ ; (5)执行受辅助transmon 403的状态控制的、第三腔404与第四腔404之间的第三c-SWAP操作413; (6)执行受辅助transmon 403的状态控制的、第一腔401与第二腔402之间的第四c-SWAP操作414。如果对辅助transmon 403进行测量415,假设没有误差,则结果为初始状态 $|+\rangle$ 。

[0094] 与图3B至图3C中在两种模式之间进行e-SWAP的过程类似,针对四个模式的e-SWAP操作可以分解为分束器操作和CPS门(图4B)并且转换为更鲁棒的量子电路(图4C)。因此,实现由图4B中的量子电路图420示出的e-SWAP门的方法包括:(1)将辅助transmon 303初始化为量子态 $|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|g\rangle + |e\rangle)$; (2)在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第一BS操作421; (3)在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第二BS操作; (4)在第二腔402与辅助transmon 403之间执行第一CPS操作423; (5)在第三腔404与辅助transmon 403之间执行第二CPS操作423; (6)在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第三BS操作425; (7)在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第四BS操作426; (8)执行使辅助transmon 403绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转427角度 2θ ; (9)在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第五BS操作428; (10)在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第六BS操作429; (11)在第三腔404与transmon 403之间执行第三CPS操作430; (12)在第二腔402与transmon 403之间执行第四CPS操作431; (13)在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第七BS操作432; (7)在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第八BS操作433。如果对辅助transmon 403进行测量415,假设没有误差,则结果为初始状态 $|+\rangle$ 。

[0095] 应当注意,并非所有操作都必须以所示顺序执行。例如,第一BS操作421和第二BS操作422被示为同时执行。在一些实施方式中,任一BS操作可以在另一BS操作之前执行。对于第三BS操作425和第四BS操作426、第五BS操作428和第六BS操作429、以及第七BS操作432和第八BS操作433同样如此。而且,第一CPS操作423被示为在第二CPS操作424之前发生。在一些实施方式中,第二CPS操作424可以在第一CPS操作423之前执行。类似地,第四CPS操作431可以在第三CPS操作430之前执行。

[0096] 在将图3C的量子电路图简化并且使该方法对误差更鲁棒的示例之后,图4C的量子电路图450包括:(1)将辅助transmon 303初始化至量子态 $|g\rangle$; (2)在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第一BS操作451; (3)在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = \pi/4$ 的第二BS操作452; (4)对辅助transmon 403执行第一哈达玛操作453; (5)在第二腔402与辅助

transmon 403之间执行第一CPS操作454; (6) 在第三腔404与辅助transmon 403之间执行第二CPS操作455; (7) 执行使辅助transmon 403绕X轴 $X_\theta = e^{i\theta\sigma_x}$ 旋转456角度 2θ ; (8) 在第三腔404与辅助transmon 403之间执行第三CPS操作457; (9) 在第二腔402与辅助transmon 403之间执行第四CPS操作458; (10) 对辅助transmon 403执行第二哈达玛操作459; (11) 在第一腔401与第二腔402之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第三BS操作460; (12) 在第三腔404与第四腔405之间执行 $\theta = -\pi/4$ 的第四BS操作461。如果对辅助transmon 403进行测量415, 假设没有误差, 则结果为初始状态 $|g\rangle$ 。

[0097] 应当注意, 并非所有操作都必须以所示顺序执行。例如, 第一BS操作451和第二BS操作452被示为同时执行。在一些实施方式中, 任一BS操作可以在另一BS操作之前执行。对于第三BS操作460和第四BS操作461也是如此。而且, 第一CPS操作454被示为在第二CPS操作455之前发生。在一些实施方式中, 第二CPS操作455可以在第一CPS操作454之前执行。类似地, 第四CPS操作458可以在第三CPS操作457之前执行。

[0098] 现在回到图3C的量子电路图340, 讨论了退相和衰变误差的存在。由于 $t_{CPS} \gg t_{Trans}$, 因此关注两个CPS门期间的transmon误差并且忽略 X_0 期间的误差。

[0099] 在一些实施方式中, 图3C中所示的用于e-SWAP操作的量子电路图340可以预示出以退相率 γ_ϕ 发生的transmon退相误差。g-e子空间中的transmon退相误差可以由以下量子信道来表征:

$$[0100] \quad \mathcal{E}_\phi(\rho) = (1 - \epsilon_\phi)\rho + \epsilon_\phi\sigma_Z\rho\sigma_Z \quad (8)$$

[0101] 其中 $\epsilon_\phi = \frac{1}{2}(1 - e^{-\gamma_\phi t_{CPS}})$ 用于在每个CPS门期间的transmon退相误差概率, 并且 $\sigma_Z = |g\rangle\langle g| - |e\rangle\langle e|$ 用于 $|g\rangle$ 态与 $|e\rangle$ 态之间的 π 相对相位跳变。在两个CPS门中的任一CPS门期间的transmon退相都会导致在测量348处测量的transmon的 $|e\rangle$ 态, 其与 $|g\rangle$ 正交并且可以被无模糊地检测到。因此, 在一些实施方式中, 检测到CPS门期间的任何一阶(即, 单次发生) transmon退相误差被检测到, 但如上所述, 不能确定发生了两个误差中的哪个, 并且因此, 误差仅被预示而无法被校正。

[0102] 在一些实施方式中, 除了基态 $|g\rangle$ 和第一激发态 $|e\rangle$ 之外, 辅助transmon的附加能级可以用于提高e-SWAP操作的鲁棒性。例如, 与transmon状态的自发衰变相关联的一阶误差既可以被预示也可以被校正。在一些实施方式中, 腔-transmon耦合哈密顿被改变成“误差透明的”, 使得对于腔的所有逻辑状态, transmon衰变的领头阶(leading order)误差与误差透明哈密顿交换。然后, 可以将演化期间发生的transmon衰变识别为在演化结束时发生的transmon衰变, 这可以明显简化误差分析。

[0103] 在一些实施方式中, 使用四个transmon能级($|g\rangle, |r\rangle, |r'\rangle, |e\rangle$), 其中 $|g\rangle - |e\rangle$ 子空间用于编码信息量子位, 而 $|r\rangle - |r'\rangle$ 子空间用于检测误差。图5A示出了transmon的能级图500。状态 $|e\rangle_{501}$ 表示某较高的激发级(例如, 高于第一激发态), 其不直接衰变到状态 $|g\rangle_{502}$, 而是作为超前衰变误差衰变到状态 $|r\rangle_{503}$ 。通过引入附加能级, 来自 $|g\rangle - |e\rangle$ 子空间的transmon衰变误差可以由以下量子信道来表征

$$[0104] \quad \mathcal{E}(\rho) = \sum_{j=0,1,\dots} K_j \rho K_j^\dagger \quad (9)$$

[0105] 其中, $K_0 = |g\rangle\langle g| + \sqrt{1 - e^{-\gamma_1 t_{CPS}}}|e\rangle\langle e|$ and $K_1 = e^{-\gamma_1 t_{CPS}/2} |r\rangle\langle e|$ 。 $|g\rangle$ - $|e\rangle$ 所跨越的子空间用于编码量子位, 而 $|e\rangle$ 、 $|r\rangle$ 和 $|r'\rangle$ 跨越的子空间具有与腔模式的均匀的色散耦合强度。

[0106] 在一些实施方式中, 使用类似于图3C中所示的电路的量子电路, 但将么正操作推广到四能级transmon。在一些实施方式中, 通过设计transmon与腔之间的色散耦合

$$[0107] \quad H_{\text{dis}} = \hbar\chi(|e\rangle\langle e| + |r\rangle\langle r| + |r'\rangle\langle r'|) \otimes \hat{n}. \quad (10)$$

[0108] 以使状态 $|e\rangle$ 、 $|r\rangle$ 和 $|r'\rangle$ 具有相同的色散位移 x 来控制对腔模式的可控制反作用, 使得CPS门为

$$[0109] \quad \text{CPS} = |g\rangle\langle g| \otimes I + (|e\rangle\langle e| + |r\rangle\langle r| + |r'\rangle\langle r'|) \otimes (-1)^{\hat{n}}. \quad (11)$$

[0110] 在一些实施方式中, 与广义哈达玛门相关联的么正算符变成

$$[0111] \quad \begin{aligned} H|g\rangle &= (|g\rangle + |e\rangle)/\sqrt{2} \\ H|e\rangle &= (|g\rangle - |e\rangle)/\sqrt{2} \\ H|r\rangle &= |r\rangle \\ H|r'\rangle &= |r'\rangle. \end{aligned} \quad (12)$$

[0112] 因此, 哈达玛旋转在 g - e 子空间内执行, 并且一般在 r - r' 子空间上起作用。

[0113] 在一些实施方式中, transmon旋转变成

$$[0114] \quad \begin{aligned} X_{\theta}|g\rangle &= \cos\theta|g\rangle + i\sin\theta|e\rangle \\ X_{\theta}|e\rangle &= i\sin\theta|g\rangle + \cos\theta|e\rangle \\ X_{\theta}|r\rangle &= |r'\rangle \\ X_{\theta}|r'\rangle &= |r\rangle, \end{aligned} \quad (13)$$

[0115] 其在 g - e 子空间内旋转并且交换 $|r\rangle$ 和 $|r'\rangle$ 。

[0116] 在一些实施方式, CPS操作变成

$$[0117] \quad \begin{aligned} \text{CPS}|g\rangle &= |g\rangle \otimes (+1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|e\rangle &= |e\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|r\rangle &= |r\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \\ \text{CPS}|r'\rangle &= |r'\rangle \otimes (-1)^{\hat{n}} \end{aligned} \quad (14)$$

[0118] 通过针对四级transmon的以上扩展门, 可以检测一阶transmon退相误差并校正一阶transmon衰变误差。

[0119] 第一CPS操作343期间的transmon衰变引起对transmon状态 $|r'\rangle$ 的测量348, 而腔模式在CPS门下继续无误差地演化, 因为衰变不改变色散耦合。第二CPS操作345期间的transmon衰变引起对transmon状态 $|r\rangle$ 的测量, 而腔模式演化为期望的 $U_{\text{eSWAP}}(\theta)$ 。因为可以明确地区分transmon衰变误差 (分别与第一CPS门和第二CPS门期间的transmon衰变相关联的 $|r'\rangle$ 态和 $|r\rangle$ 态), 所以在一些实施方式中可以主动地校正CPS门期间的一阶transmon衰变误差。

[0120] 在一些实施方式中, 通过将 r - r' 子空间折叠到单个状态 $|r\rangle$ 并且将 r - r' 折叠内的操作减少为对状态 $|r\rangle$ 的平凡操作 (例如, $X_{\theta}|r\rangle = |r\rangle$), 可以使用三个transmon能级 ($|g\rangle$, $|$

$r\rangle, |e\rangle$)。在一些实施方式中,这样的检测方案还可以检测transmon热加热(例如, $|g\rangle \rightarrow |r\rangle$)。因此,三级transmon辅助模式足以实现在CPS门期间的一阶transmon退相/衰变/加热误差的检测。

[0121] 在一些实施方式中,通过部署附加的transmon级来校正transmon的衰变和加热误差两者。例如,可以使用具有图5B的能级图510中所示的具有衰变转变的六个transmon级511至516 ($|g\rangle, |e\rangle, |r\rangle, |r'\rangle, |s\rangle, |s'\rangle$)和式(10)中的色散耦合。在一些实施方式中,在g-e子空间中编码信息的量子位。基于引起 $|r'\rangle$ 或 $|r\rangle$ 的transmon状态的测量,可以校正第一CPS门或第二CPS门期间的transmon衰变误差。基于对 $|s'\rangle$ 或 $|s\rangle$ 的transmon状态的测量,可以校正第一CPS门或第二CPS门期间的transmon加热误差。

[0122] 一些实施方式在各种应用中使用上述技术。例如量子路由器、量子RAM、量子状态比较、量子主成分分析或通用量子计算。

[0123] 在用于信息处理的模块化体系结构中,路由器在连接不同模块和模块内的不同部件中有不可或缺的作用。存在用于经典和量子信息处理的许多不同类型的路由器。如表1中所列出的,可以基于输入信号和控制信号的经典/量子(C/Q)性质来将路由器分类。不同类型的路由器和示例相关应用。经典-经典路由器仅是经典的交换机。经典-量子路由器向经典地址发送量子信息。量子-量子路由器向地址的量子叠加发送量子信息。量子-经典路由器向量子地址发送经典信息。然而,由于信息是经典的,量子态坍缩使得仅一个地址接收经典信号。这是在量子测量中发生的,其中半经典“仪表”与量子态纠缠,并且当仪表被“读取”时该量子态“坍缩”

控制\输入	经典的	量子
经典	C-C 路由器 (例如, 经典交换机)	C-Q 路由器 (例如, 量子网络)
量子	Q-C 路由器 (例如, 量子测量)	Q-Q 路由器 (例如, 量子 RAM)

[0124] 表1

[0125] 在一些实施方式中,使用c-SWAP操作通过以下操作来实现Q-Q路由器:(1)将量子输入和控制信号分别存储在腔模式和transmon模式中,(2)在以transmon模式为条件的腔模式上应用c-SWAP操作,以及(3)从腔模式和transmon模式中取回量子信号。

[0126] 在一些实施方式中,可以使用c-SWAP操作来实现量子随机存取存储器(RAM)。量子RAM可以使用地址的相干量子叠加来执行存储器访问。为了构建有效的量子RAM,使用具有三级(transmon)存储器(标记为“0”、“L”和“R”)和三个腔模式(标记为“输入”、“左”和“右”)的Q-Q路由器。(transmon)存储器被初始化为“0”状态,并且所有三个腔被初始化为真空|

vac>状态。Q-Q路由器的目标是处理或路由量子信号,量子信号可以是真空|vac>、左|L>、或右|R>三种可能状态的叠加。

[0128] 在一些实施方式中,Q-Q路由器具有五种不同的功能设置:(1)闲置,(2)存储控制信号,(3)正向路由信号,(4)反向路由信号以及(5)取回控制信号。注意,步骤(2)和(3)可以用于开辟朝向目标存储器的路径,而步骤(4)和(5)可以用于进行逆么正以去使量子RAM去耦合。

[0129] 在一些实施方式中,这五个功能设置中的每一个的操作如下:

[0130] (1)当Q-Q路由器空闲时,不需要应用操作。

[0131] (2)为了存储控制信号,Q-Q路由器将进入的控制信号存储在输入腔中,然后将该控制信号从输入腔传输到transmon模式。

[0132] (3)为了正向路由信号,Q-Q路由器将信号临时存储在输入腔中。然后,以(transmon)存储器处于状态“0”、“L”或“R”为条件,Q-Q路由器(经由c-SWAP操作)将量子信号分别引导到“输入”腔、“左”腔或“右”腔。最后,Q-Q路由器释放“左”腔和“右”腔中的信号以允许其继续移动到下一级。

[0133] (4)为了反向路由信号,Q-Q路由器执行(3)的相反操作。例如,Q-Q路由器将进入的信号存储到“左”腔和“右”腔。然后,以(transmon)存储器状态“0”、“L”或“R”为条件,Q-Q路由器(经由c-SWAP操作)将“输入”腔、“左”腔或“右”腔中的量子信号分别引导到“输入”腔。最后,Q-Q路由器从输入腔取回信号。

[0134] (5)为了接收控制信号,Q-Q路由器执行(2)的相反操作。例如,Q-Q路由器将控制信号从(transmon)存储器传输到输入腔,并且然后从输入腔取回信号。

[0135] 在一些实施方式中,可以使用c-SWAP操作来估计两个量子态的交叠。例如,如果transmon被初始化成 $|g\rangle + |e\rangle$ 态并且两个子系统(腔)的量子态由密度矩阵 ρ^A 和 ρ^B 表示,则初始输入状态为:

$$[0136] \quad (|g\rangle + |e\rangle)(\langle g| + \langle e|) \otimes \rho^A \otimes \rho^B \quad (15)$$

[0137] 在c-SWAP操作之后,状态变为:

$$[0138] \quad |g\rangle\langle g| \otimes \rho^A \otimes \rho^B + |g\rangle\langle e| \otimes [(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] + |e\rangle\langle g| \otimes [SWAP_{AB}(\rho^A \otimes \rho^B)] + |e\rangle\langle e| \otimes [SWAP_{AB}(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] \quad (16)$$

[0139] 其中,减小的密度矩阵取以下形式

$$[0140] \quad \rho_{\text{transmon}} = |g\rangle\langle g| + |g\rangle\langle e| \text{Tr} \rho^A \rho^B + |e\rangle\langle g| \text{Tr} \rho^A \rho^B + |e\rangle\langle e| \quad (17)$$

[0141] 其中,使用特性

$$[0142] \quad \begin{aligned} \text{Tr}[(\rho^A \otimes \rho^B)SWAP_{AB}] &= \text{Tr}[(\rho_{i,j}^A \otimes \rho_{k,l}^B) \delta_{i,l} \delta_{j,k}] \\ &= \sum_{i,j} \rho_{i,j}^A \rho_{j,i}^B \\ &= \text{Tr} \rho^A \rho^B \\ &= \text{Tr} \rho^B \rho^A. \end{aligned} \quad (18)$$

[0143] 因此,在一些实施方式中,通过测量 ρ_{transmon} 的相位相干(例如,冉赛条纹(Ramsey

fringe) 对比), 可以提取交叠 $0(\rho^A, \rho^B) \equiv \text{Tr} \rho^A \rho^B$, 其总是实数。

[0144] 在一些实施方式中, 以 $|g\rangle + |e\rangle$ 为基础投影地测量 transmon。如果 transmon 被测量为 $|g\rangle \pm |e\rangle$, 则两个子系统被投影到对称子空间 (即, 用于 SWAP 算符的本征值 +1 的本征子空间),

$$[0145] \quad \rho_{A,B}^{(+)} = \Pi_+(\rho^A \otimes \rho^B) \Pi_+ \quad (19)$$

[0146] 其中 Π_+ 是投影算符。如果 transmon 被测量为 $|g\rangle + |e\rangle$, 则两个子系统被投影到反对称子空间 (即, 用于 SWAP 算符的本征值 -1 的本征子空间),

$$[0147] \quad \rho_{A,B}^{(-)} = \Pi_-(\rho^A \otimes \rho^B) \Pi_- \quad (20)$$

[0148] 其中投影算符 $\Pi_- = 1 - \Pi_+$ 。随后的测量应该给出相同的结果, 该结果与这些测量的量子非破坏性质相符。

[0149] 在一些实施方式中, 出于量子状态比较的目的, 如图6所示的作用于第一腔601、第二腔602和 transmon 603的更鲁棒的量子电路600包括以下修改: (1) 去除对于量子态比较目的而言不必要的第二分束器 (参见图2B); (2) 将 transmon 初始化为 $|g\rangle$ 且恰好在 CPS 门之前旋转到 $|g\rangle + |e\rangle$ 以避免在第一分束器操作期间的 transmon 退相干。简化电路600使分束器操作的使用和 transmon probe 的退相干最小化, 并且包括: (1) 第一腔601与第二腔602之间的第一分束器操作605; (2) 对 transmon 603的第一哈达玛操作606; (3) 第二腔602与 transmon 603之间的 CPS 操作607; (4) 对 transmon 603的第二哈达玛操作608; 以及 (5) transmon 603状态的测量609。注意, 该简化电路也可以被解释为在分束器操作之后的第二腔模式的宇称测量。基于投影算符对于对称子空间 Π_+ 的属性, 可以容易地证明这种解释是合理的, 对称子空间 Π_+ 由具有非负整数 n, m 的对称状态 $(a^\dagger - b^\dagger)^{2n} (a^\dagger + b^\dagger)^m |vac\rangle$ 跨越 (类似地, 反对称子空间 Π_- 由反对称状态 $(a^\dagger - b^\dagger)^{2n+1} (a^\dagger + b^\dagger)^m |vac\rangle$ 跨越)。回想一下, 在 50/50 分束器之后, $a^\dagger \pm b^\dagger$ 分别对应于第一腔模式和第二腔模式的创建算符。因此, 在第二腔模式中对称状态总是具有 $2n$ 偶数激发, 而反对称状态总是具有 $2n+1$ 奇数激发。

[0150] 对于 ρ^A 和 ρ^B 中的每一个, 获得与 transmon 测量相关联的二元结果 0 或 1。需要 $N \sim \epsilon^{-2}$ 对 ρ^A 和 ρ^B 来可靠地估计具有精度 ϵ 的交叠 $0(\rho^A, \rho^B)$ 。

[0151] 在一些实施方式中, 可以使用 e-SWAP 操作来执行量子主成分分析 (qPCA), 这可以用来实现根据大数据集的机器学习。更具体地, qPCA 可以揭示同样准备的密度矩阵的全体的最大本征值。关键构思是使用 e-SWAP 的以下特性

$$[0152] \quad \text{Tr} \rho e^{-i\text{SWAP}\Delta t} (\rho \otimes \sigma) e^{i\text{SWAP}\Delta t} = \sigma - i\Delta t [\rho, \sigma] + O(\Delta t^2) \approx e^{-i\rho\Delta t} \sigma e^{i\rho\Delta t} \quad (21)$$

[0153] 其有效地模拟哈密顿演化, 其中, 哈密顿是小持续时间 Δt 的厄米密度矩阵 $H = \rho$ 。利用密度矩阵 ρ 的 n 个相同的副本, 可以构建 $e^{-i\rho n \Delta t} \sigma e^{i\rho n \Delta t}$ 。在一些实施方式中, 与量子相位估计算法一起, 可以有效地估计与密度矩阵 ρ 的最大的几个本征值相关联的相位。根据本文一些实施方式的 e-SWAP 门将实现 qPCA 的关键步骤的物理实现方式。

[0154] 在一些实施方式中, 使用 e-SWAP 门来实现利用玻色子系统的通用量子计算, 其可以与任意单模玻色子编码 (表示为 $|\tilde{0}\rangle$ 和 $|\tilde{1}\rangle$) 兼容。例如, 如果使用四个这种玻色子模式对一个逻辑量子位进行编码, 四轨道逻辑量子位基础为

$$\begin{aligned}
 [0155] \quad |0_Q\rangle &= 1/2 (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle + |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{1,2} \otimes (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle - |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{3,4} \\
 |1_Q\rangle &= 1/2 (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle - |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{1,2} \otimes (|\tilde{0}\tilde{1}\rangle + |\tilde{1}\tilde{0}\rangle)_{3,4}
 \end{aligned} \quad (22)$$

[0156] 其中子索引标记模式。由于 $|\tilde{0}\tilde{1}\rangle \pm |\tilde{1}\tilde{0}\rangle$ 分别是具有本征值 ± 1 的SWAP算符的本征态,因此四轨逻辑Z旋转是e-SWAP操作

$$[0157] \quad Z_Q(\theta) = \exp[-i\theta \text{SWAP}_{1,2}] = \exp[i\theta \text{SWAP}_{3,4}] \quad (23)$$

[0158] 此外,有 $\text{SWAP}_{1,3}\text{SWAP}_{2,4}|0_Q\rangle = |1_Q\rangle = X_Q|0_Q\rangle$,这得出四轨道逻辑X旋转是四模e-SWAP操作

$$[0159] \quad X_Q(\theta) = \exp[-i\theta \text{SWAP}_{1,3}\text{SWAP}_{2,4}] \quad (24)$$

[0160] 最后,两个编码四轨道逻辑量子位之间的受控Z门是另一个四模e-SWAP操作

$$[0161] \quad \text{CZ}(\theta) = \exp[-i\theta \text{SWAP}_{1,2}\text{SWAP}_{1',2'}] \quad (25)$$

[0162] 其中子索引 $1'$ 和 $2'$ 标记来自另一个四轨道逻辑量子位的前两个玻色子模式。给定任意的逻辑Z旋转和逻辑X旋转以及受控Z门,则足以实现任意通用量子计算。因为上述门不取决于正交基 $|\tilde{0}\rangle$ 和 $|\tilde{1}\rangle$ 的选择的细节,所以该方案能够用于任何单模玻色子编码,包括cat码、二项式码、GKP码等。因此,对e-SWAP实现方式的上述鲁棒设计(参见图4C)足以实现通用量子计算的关键成分。

[0163] 因此,已经描述了本公开内容中阐述的技术的若干方面和实施方式,应当理解,本领域技术人员将容易想到各种变更、修改和改进。这样的变更、修改和改进旨在处于本文描述的技术的精神和范围内。例如,本领域普通技术人员将容易地设想用于执行本文所述的功能和/或获得本文所述的结果和/或一个或多个优点的多种其他手段和/或结构,并且这样的变化和/或修改中的每一个被认为在本文所述的实施方式的范围内。本领域技术人员将认识到或能够使用不超过常规实验确定本文所述的具体实施方式的许多等同方案。因此,应当理解,前述实施方式仅以示例的方式呈现,并且在所附权利要求及其等同物的范围内,可以以不同于具体描述的方式来实践本发明的实施方式。此外,如果本文中描述的特征、系统、制品、材料、套件和/或方法不是相互矛盾的,则两个或多个这样的特征、系统、制品、材料、套件和/或方法的任何组合被包括在本公开内容的范围内。

[0164] 此外,如所描述的,一些方面可以被实现为一个或多个方法。作为该方法的一部分执行的动作可以以任何合适的方式排序。因此,可以构造以与所示顺序不同的顺序执行动作的实施方式,该实施方式可以包括同时执行一些动作,即使这些动作在说明性实施方式中被示为顺序动作。

[0165] 如在本文中定义和使用的,所有定义应该被理解为对字典定义、通过引用并入的文献中的定义和/或所定义术语的普通含义的控制。

[0166] 除非明确相反地指示,否则如本说明书和权利要求书中所使用的不定冠词“一(a)”和“一个(an)”应该理解为意味着“至少一个”。

[0167] 在说明书和权利要求书中使用的短语“和/或”应当理解为是指如此结合的元素中的“任一个者两者”,即,在一些情况下以结合方式存在而在其他情况下分开存在的元素。用“和/或”列出的多个元素应当以相同的方式来解释,即,如此结合的元素中的“一个或多个”元素。除了由“和/或”子句具体指出的元素之外,可以可选地存在其他元素,无论与那些

具体指出的元素相关还是不相关。因此,作为非限制性示例,在与诸如“包括”等开放式语言结合使用时,对“A和/或B”的引用在一个实施方式中可以仅指A(可选地包括除B以外的元素);在另一实施方式中可以仅指B(可选地包括除A以外的元素);在又一实施方式中可以指A和B两者(可选地包括其他元素);等。

[0168] 如本文在说明书和权利要求书中所使用的,在提及一个或更多个元素列表时,短语“至少一个”应当理解为意味着选自元素列表中的任何一个或更多个元素的至少一个元素,但不一定包括在元素列表中具体列出的每个和每一个元素中的至少一个,并且不排除元素列表中的元素的任何组合。该定义还允许,可以可选地存在除了短语“至少一个”所指的元素列表中具体指出的元素之外的元素,无论该元素与具体指出的那些元素相关还是不相关。因此,作为非限制性示例,“A和B中的至少一个”(或等效地,“A或B中的至少一个”,或等效地,“A和/或B中的至少一个”)在一个实施方式中可以指至少一个A(可选地包括多于一个A)而不存在B(并且可选地包括除B以外的元素);在另一个实施方式中,可以指至少一个B(可选地包括多于一个B)而不存在A(并且可选地包括除A以外的元素);在又一实施方式中,可以指至少一个A(可选地包括多于一个A)以及至少一个B(可选地包括多于一个B)(并且可选地包括其他元素);等。

[0169] 此外,这里使用的措辞和术语是为了描述的目的,而不应被认为是限制。本文中“包括”、“包含”或“具有”、“含有”、“涉及”及其变型的使用意味着涵盖其后列出的项及其等同物以及附加项。

[0170] 在权利要求书以及上面的说明书中,所有过渡短语例如“包括”、“包含”、“带有”、“具有”、“含有”、“涉及”、“持有”、“组成”等应理解为开放式的,即意味着包括但不限于。仅过渡短语“由组成”和“基本上由组成”分别应为封闭或半封闭的过渡短语。

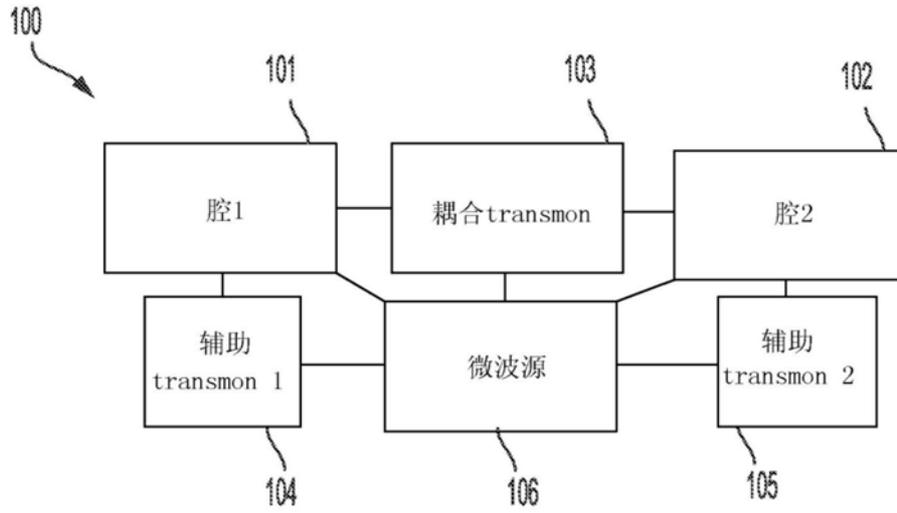


图1A

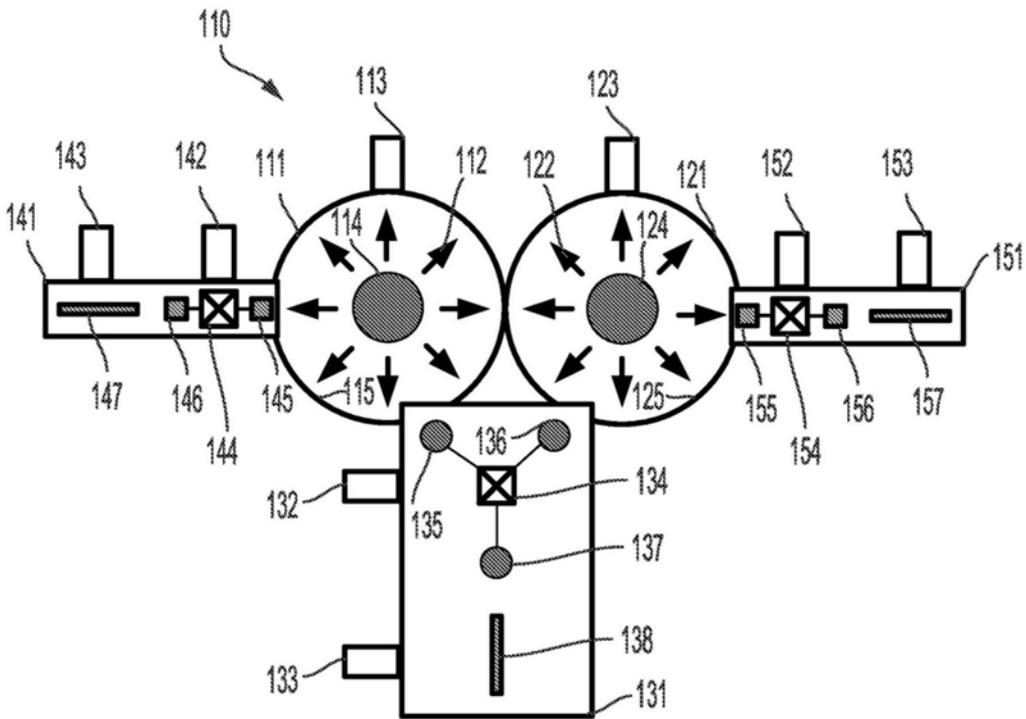


图1B

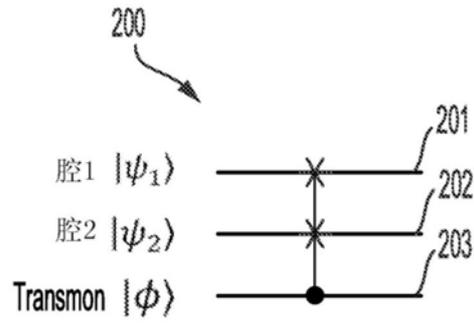


图2A

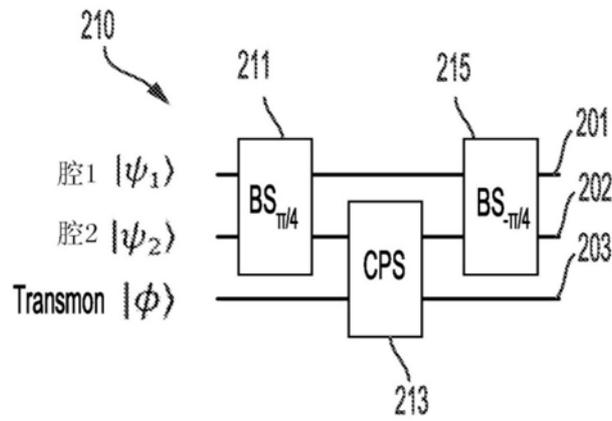


图2B

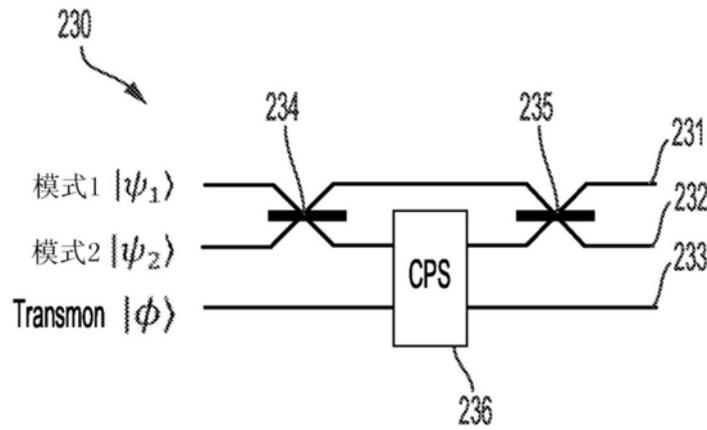


图2C

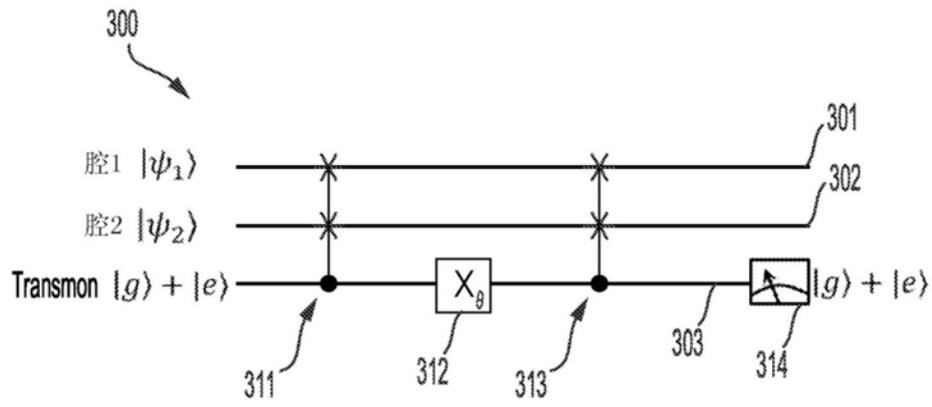


图3A

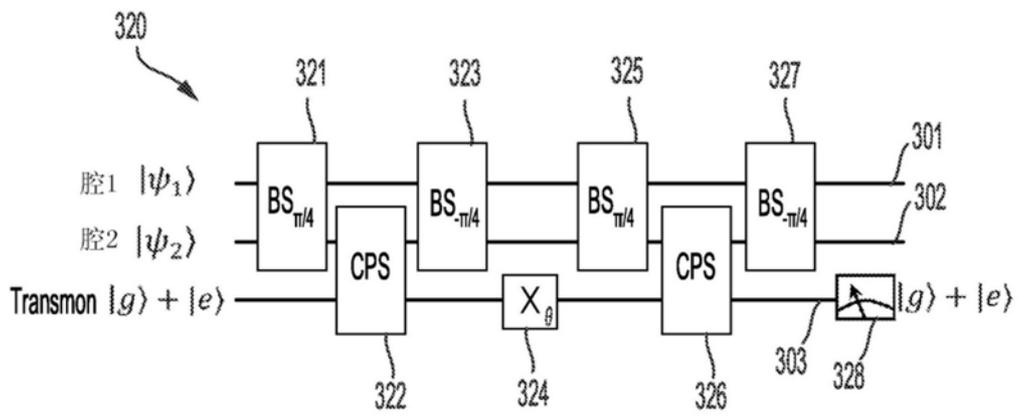


图3B

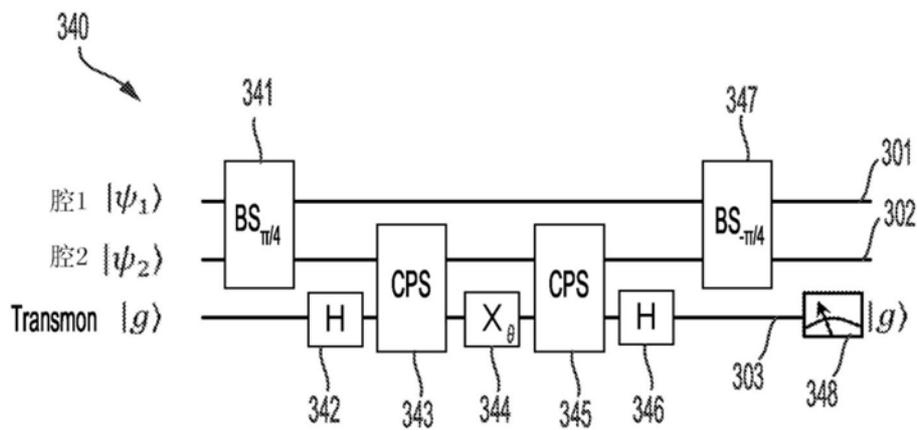


图3C

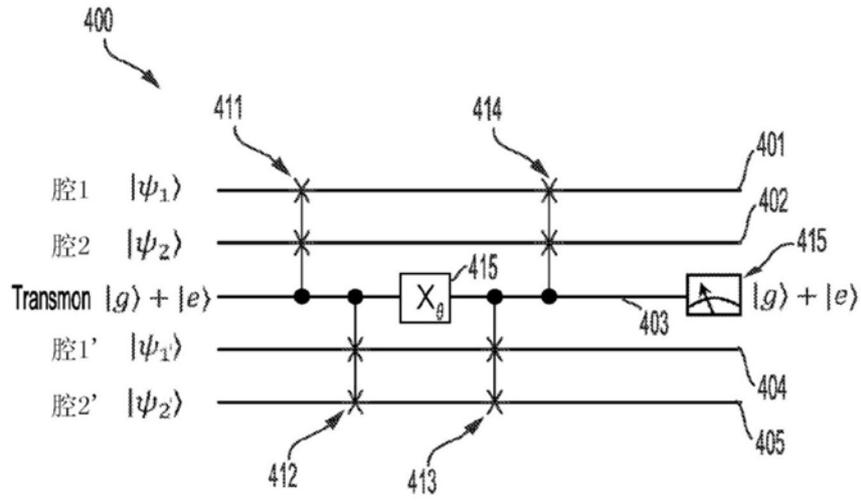


图4A

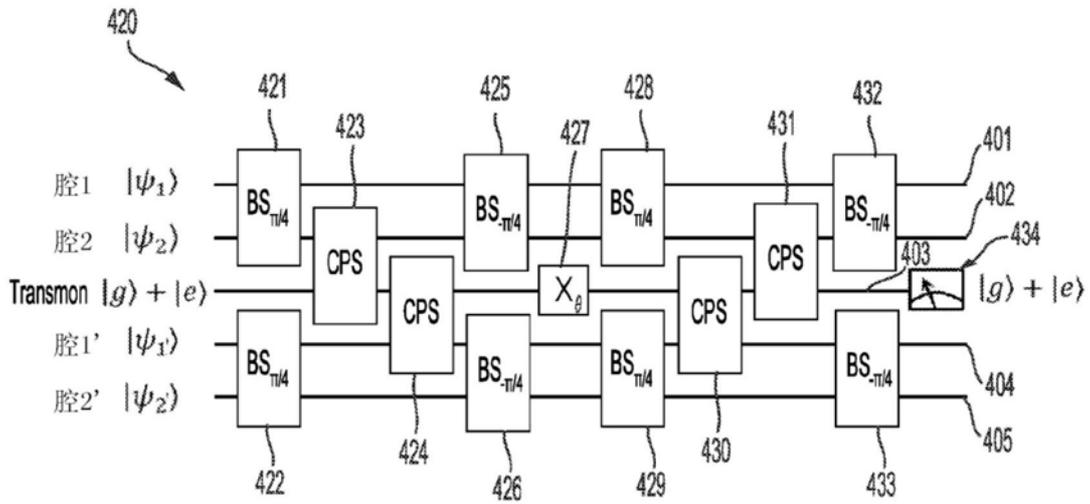


图4B

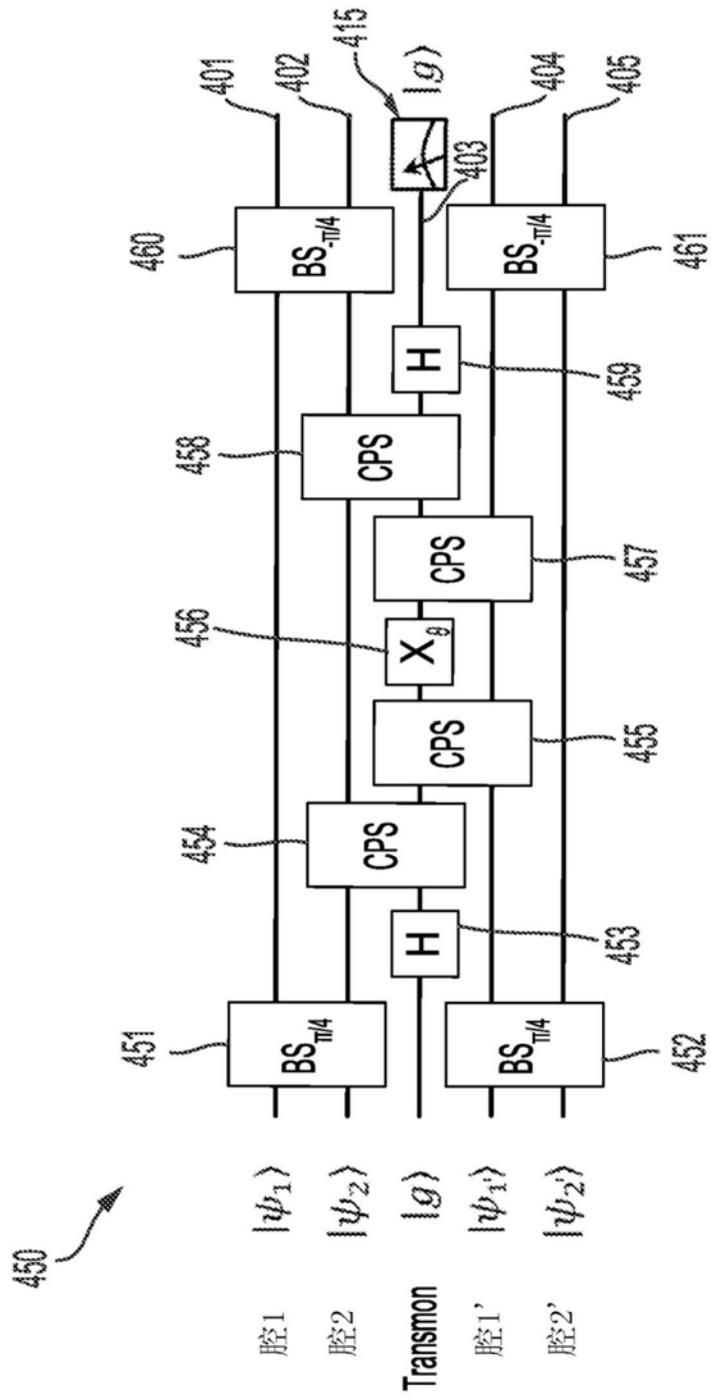


图4C

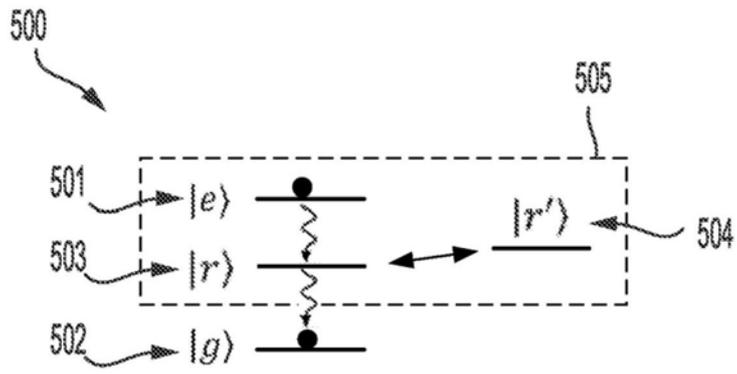


图5A

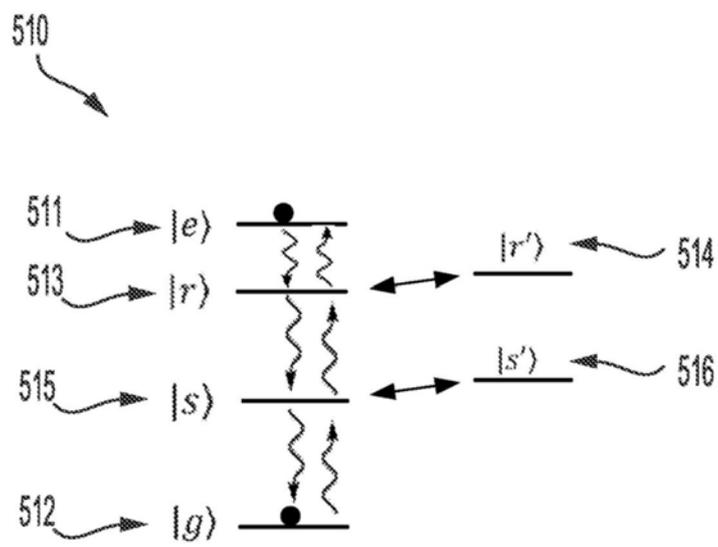


图5B

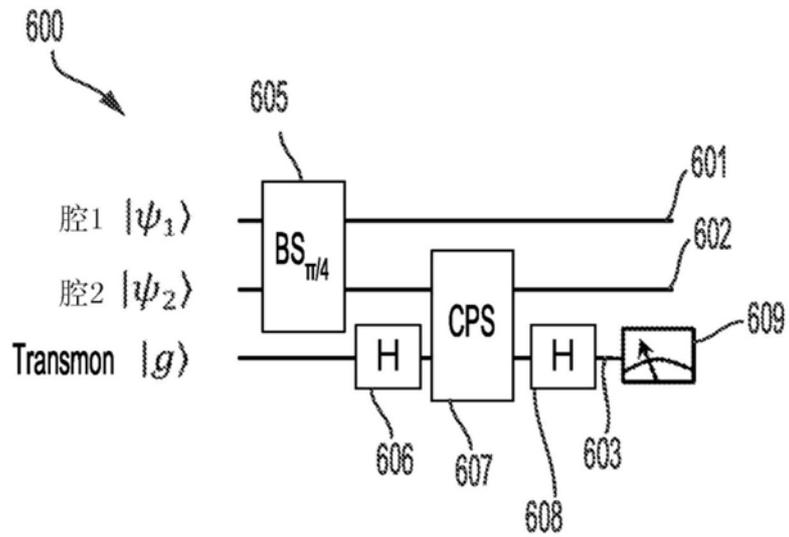


图6