



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118575070 A

(43) 申请公布日 2024. 08. 30

(21) 申请号 202280089391.1

(22) 申请日 2022.12.22

(30) 优先权数据

63/293,034 2021.12.22 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2024.07.18

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2022/053816 2022.12.22

(87) PCT国际申请的公布数据

W02023/191872 EN 2023.10.05

(71) 申请人 耶鲁大学

地址 美国

(72) 发明人 詹姆斯·泰奥 尼尔·塔库尔

本杰明·查普曼

斯泰恩·德格拉夫

史蒂文·M·格文 施卢蒂·普里

罗伯特·J·舍尔科普夫三世

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

专利代理师 高岩

(51) Int.Cl.

G01N 10/40 (2006.01)

G01N 10/70 (2006.01)

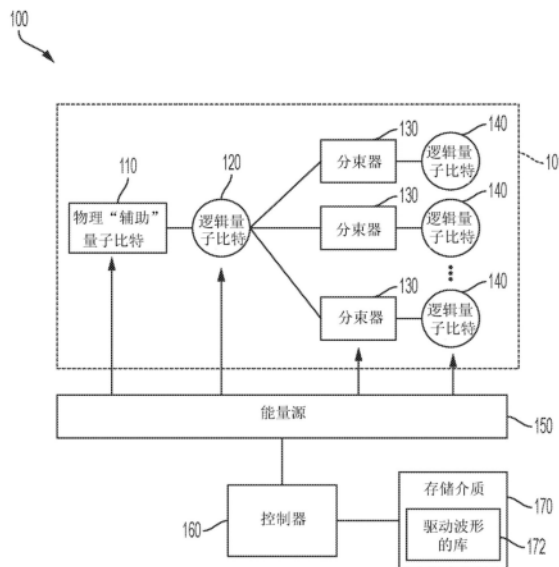
权利要求书4页 说明书25页 附图20页

(54) 发明名称

用于四脚猫代码的基于测量的容错架构

(57) 摘要

提供了用于执行用于四脚猫代码的容错量子操作的系统和方法。量子系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的辅助量子比特,并且量子系统可以至少部分地通过以下操作来操作:生成第一驱动波形并且向辅助量子比特施加第一驱动波形,该第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳,该 π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率;以及读出辅助量子比特的状态。



1. 一种操作电路量子电动力学系统的方法,所述电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的辅助量子比特,所述方法包括:

至少部分地通过以下操作来执行量子操作:

生成第一驱动波形并且向所述辅助量子比特施加所述第一驱动波形,所述第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳,所述 π 脉冲具有与所述第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率;以及

读出所述辅助量子比特的状态。

2. 根据权利要求1所述的方法,还包括:在读出所述辅助量子比特的状态之前,生成第二驱动波形并且向所述辅助量子比特施加所述第二驱动波形,所述第二驱动波形包括 π 脉冲的第二梳,所述 π 脉冲具有与所述第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第二选择对应的选择性频率。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中:

所述第一选择包括选择性频率 3χ 、 4χ 、 7χ 和 8χ ,以及

所述第二选择包括选择性频率 1χ 、 2χ 、 5χ 和 6χ 。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述电路量子电动力学系统还包括由第一分束器耦合至所述第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特,所述方法还包括在读出所述辅助量子比特的状态之前,向所述第一分束器施加第三驱动波形,以在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中,执行所述量子操作包括在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间生成贝尔态。

6. 根据权利要求4所述的方法,其中,在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间进行所述失谐分束器相互作用包括在第一腔谐振器与第二腔谐振器之间进行所述失谐分束器相互作用。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中,生成并施加所述第一驱动波形包括生成并施加微波波形。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中,生成并施加所述第一驱动波形包括生成所述第一驱动波形并且向超导传输子施加所述第一驱动波形。

9. 根据权利要求4所述的方法,还包括至少部分地通过以下操作来生成第一四量子比特簇态:

向耦合所述第一逻辑量子比特和第三逻辑量子比特的第二分束器施加第四驱动波形;以及

向将所述第二逻辑量子比特耦合至第四逻辑量子比特的第三分束器施加第五驱动波形。

10. 根据权利要求9所述的方法,还包括至少部分地通过以下操作来生成多量子比特簇态:

向耦合所述第一四量子比特簇态的第一逻辑量子比特和第二四量子比特簇态的第一逻辑量子比特的第四分束器施加第六驱动波形。

11. 一种量子信息处理系统,包括:

辅助量子比特;

色散耦合至所述辅助量子比特的第一逻辑量子比特;以及
至少一个控制器,所述至少一个控制器被配置成:
至少部分地通过以下操作来执行量子操作:

生成第一驱动波形并且向所述辅助量子比特施加所述第一驱动波形,所述第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳,所述 π 脉冲具有与所述第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率;以及

读出所述辅助量子比特的状态。

12. 根据权利要求11所述的量子信息处理系统,其中,所述至少一个控制器还被配置成在读出所述辅助量子比特的状态之前,生成第二驱动波形并且向所述辅助量子比特施加所述第二驱动波形,所述第二驱动波形包括 π 脉冲的第二梳,所述 π 脉冲具有与所述第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第二选择对应的选择性频率。

13. 根据权利要求12所述的量子信息处理系统,其中:

所述第一选择包括选择性频率 3χ 、 4χ 、 7χ 和 8χ ,以及

所述第二选择包括选择性频率 1χ 、 2χ 、 5χ 和 6χ 。

14. 根据权利要求11所述的量子信息处理系统,还包括由分束器耦合至所述第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特。

15. 根据权利要求14所述的量子信息处理系统,其中,所述至少一个控制器还被配置成在读出所述辅助量子比特的状态之前,生成第三驱动波形并且向所述分束器施加所述第三驱动波形,以在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。

16. 根据权利要求15所述的量子信息处理系统,其中,所述至少一个控制器被配置成执行所述量子操作包括:所述至少一个控制器被配置成在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间生成贝尔态。

17. 根据权利要求14所述的量子信息处理系统,其中,所述第一逻辑量子比特和所述第二逻辑量子比特包括第一腔谐振器和第二腔谐振器。

18. 根据权利要求11所述的量子信息处理系统,其中,所述第一驱动波形包括微波波形。

19. 根据权利要求11所述的量子信息处理系统,其中,所述辅助量子比特包括超导传输子。

20. 一种操作电路量子电动力学系统的方法,所述电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的辅助量子比特和由第一分束器耦合至所述第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特,所述方法包括:

向所述辅助量子比特施加第一驱动波形,所述第一驱动波形包括 $\pi/2$ 脉冲;

向所述第一分束器施加第二驱动波形以在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用;

向所述辅助量子比特施加第三驱动波形,所述第三驱动波形包括 $\pi/2$ 脉冲;以及

读出所述辅助量子比特的状态。

21. 根据权利要求20所述的方法,其中,所述电路量子电动力学系统还包括第三逻辑量子比特,所述第三逻辑量子比特由第二分束器耦合至所述第一逻辑量子比特,并且所述方

法还包括：

在施加所述第二驱动波形之后，向所述第二分束器施加第四驱动波形以在所述第一逻辑量子比特与所述第三逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。

22. 一种操作电路量子电动力学系统的方法，所述电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的第一辅助量子比特和色散耦合至第二逻辑量子比特的第二辅助量子比特，所述第一逻辑量子比特由第一分束器耦合至所述第二逻辑量子比特，所述方法包括：

向所述第一分束器施加第一驱动波形以在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间进行共振分束器相互作用；以及

通过以下操作确定所述第一逻辑量子比特和所述第二逻辑量子比特中的至少一个是否处于真空状态：

向所述第一辅助量子比特施加第二驱动波形以测量所述第一逻辑量子比特的状态；以及

向所述第二辅助量子比特施加第三驱动波形以测量所述第二逻辑量子比特的状态。

23. 一种操作电路量子电动力学系统的方法，所述电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的第一辅助量子比特、色散耦合至第二逻辑量子比特的第二辅助量子比特、和第三逻辑量子比特，所述第一逻辑量子比特和所述第二逻辑量子比特由第一分束器耦合，并且所述第二逻辑量子比特和所述第三逻辑量子比特由第二分束器耦合，所述方法包括：

在所述第一逻辑量子比特中制备任意逻辑状态；

在所述第二逻辑量子比特与所述第三逻辑量子比特之间制备贝尔态；以及

通过将所述任意逻辑状态从所述第一逻辑量子比特隐形传送到所述第三逻辑量子比特，来对所述任意逻辑状态执行纠错，所述隐形传送包括：

使用所述第一分束器在所述第一逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间引入干扰；以及

在使用所述第一分束器之后，使用所述第一辅助量子比特和所述第二辅助量子比特执行所述第一逻辑量子比特和所述第二逻辑量子比特的状态的至少一次测量。

24. 根据权利要求23所述的方法，其中，制备所述贝尔态包括：

在所述第二逻辑量子比特中制备第一相干态；

在所述第三逻辑量子比特中制备第二相干态；以及

对所述第二逻辑量子比特和所述第三逻辑量子比特执行一系列联合奇偶性测量。

25. 一种电路量子电动力学系统，包括：

辅助量子比特；以及

多个逻辑量子比特，所述多个逻辑量子比特包括：

色散耦合至所述辅助量子比特的第一逻辑量子比特；以及

由分束器耦合至所述第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特。

26. 根据权利要求25所述的电路量子电动力学系统，其中，所述辅助量子比特包括超导传输量子比特。

27. 根据权利要求25所述的电路量子电动力学系统，其中，所述第二逻辑量子比特包括

多个逻辑量子比特。

28. 根据权利要求27所述的电路量子电动力学系统, 其中, 所述多个逻辑量子比特中的逻辑量子比特包括玻色子模式。

29. 一种系统, 包括:

根据权利要求6所述的电路量子电动力学系统; 以及

至少一个控制器, 所述至少一个控制器被配置成:

在所述第一逻辑量子比特中制备任意逻辑状态;

在所述第二逻辑量子比特与所述第三逻辑量子比特之间制备贝尔态; 以及

通过将所述任意逻辑状态从所述第一逻辑量子比特隐形传送到所述第三逻辑量子比特, 来对所述任意相干态执行纠错, 所述隐形传送包括:

使用至少一个分束器在所述逻辑量子比特与所述第二逻辑量子比特之间引入干扰; 以及

在使用所述至少一个分束器之后, 使用所述第一辅助量子比特和所述第二辅助量子比特执行所述第一逻辑量子比特和所述第二逻辑量子比特的状态的至少一次测量。

用于四脚猫代码的基于测量的容错架构

[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2021年12月22日提交的标题为“MEASUREMENT-BASED FAULT TOLERANT ARCHITECTURE FOR THE 4-LEGGED CAT CODE”的美国临时专利申请第63/293,034号的权益,该美国临时申请的全部内容通过引用并入本文中。

[0003] 关于联邦政府资助研究的声明

[0004] 本发明是在由美国陆军研究局授予的W911NF-18-1-0212下由政府支持进行的。政府对本发明有一定的权利。

背景技术

[0005] 量子信息处理技术通过操纵一个或更多个量子对象来执行计算。这些技术有时被称为“量子计算”。为了执行计算,量子信息处理器利用量子对象来可靠地存储和检索信息。根据一些量子信息处理方法,已经开发了对经典计算“比特”(等于1或0)的量子模拟,其被称为量子比特或“昆比特”。量子比特可以由具有两个不同态(可以被认为是1态和0态)的任何量子系统构成,但是还具有系统可以被置于量子叠加并且因此同时以这两个态存在的特殊属性。

发明内容

[0006] 一些实施方式涉及一种操作电路量子电动力学系统的方法,该电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的辅助量子比特。该方法包括至少部分地通过以下操作来执行量子操作:生成第一驱动波形并且向辅助量子比特施加第一驱动波形,该第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳, π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率;以及读出辅助量子比特的状态。

[0007] 一些实施方式涉及一种量子信息处理系统,该量子信息处理系统包括:辅助量子比特;色散耦合至辅助量子比特的第一逻辑量子比特;以及至少一个控制器,其被配置成至少部分地通过以下操作来执行量子操作:生成第一驱动波形并且向辅助量子比特施加第一驱动波形,该第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳,该 π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率;以及读出辅助量子比特的状态。

[0008] 在一些实施方式中,方法包括在读出辅助量子比特的状态之前,生成第二驱动波形并且向辅助量子比特施加第二驱动波形,该第二驱动波形包括 π 脉冲的第二梳,该 π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第二选择对应的选择性频率。

[0009] 在一些实施方式中,第一选择包括选择性频率 3χ 、 4χ 、 7χ 和 8χ ,以及第二选择包括选择性频率 1χ 、 2χ 、 5χ 和 6χ 。

[0010] 在一些实施方式中,电路量子电动力学系统还包括由第一分束器耦合至第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特,方法还包括在读出辅助量子比特的状态之前,向第一分束器施加第三驱动波形,以在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相

相互作用。

[0011] 在一些实施方式中,执行量子操作包括在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间生成贝尔态。

[0012] 在一些实施方式中,在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用包括在第一腔谐振器与第二腔谐振器之间进行失谐分束器相互作用。

[0013] 在一些实施方式中,生成并施加第一驱动波形包括生成并施加微波波形。

[0014] 在一些实施方式中,生成并施加第一驱动波形包括生成第一驱动波形并且向超导传输子(transmon)施加第一驱动波形。

[0015] 在一些实施方式中,方法还包括至少部分地通过以下操作来生成第一四量子比特簇态:向耦合第一逻辑量子比特和第三逻辑量子比特的第二分束器施加第四驱动波形;以及向将第二逻辑量子比特耦合至第四逻辑量子比特的第三分束器施加第五驱动波形。

[0016] 在一些实施方式中,方法还包括至少部分地通过以下操作来生成多量子比特簇态:向耦合第一四量子比特簇态的第一逻辑量子比特和第二四量子比特簇态的第一逻辑量子比特的第四分束器施加第六驱动波形。

[0017] 一些实施方式涉及一种操作电路量子电动力学系统的方法,该电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的辅助量子比特和由第一分束器耦合至第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特。方法包括:向辅助量子比特施加第一驱动波形,第一驱动波形包括 $\pi/2$ 脉冲;向第一分束器施加第二驱动波形以在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用;向辅助量子比特施加第三驱动波形,第三驱动波形包括 $\pi/2$ 脉冲;以及读出辅助量子比特的状态。

[0018] 在一些实施方式中,电路量子电动力学系统还包括第三逻辑量子比特,该第三逻辑量子比特由第二分束器耦合至第一逻辑量子比特,并且方法还包括在施加第二驱动波形之后,向第二分束器施加第四驱动波形以在第一逻辑量子比特与第三逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。

[0019] 一些实施方式涉及一种操作电路量子电动力学系统的方法,该电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的第一辅助量子比特和色散耦合至第二逻辑量子比特的第二辅助量子比特,第一逻辑量子比特由第一分束器耦合至第二逻辑量子比特。方法包括:向第一分束器施加第一驱动波形以在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行共振分束器相互作用;以及通过以下操作确定第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特中的至少一个是否处于真空状态:向第一辅助量子比特施加第二驱动波形以测量第一逻辑量子比特的状态,以及向第二辅助量子比特施加第三驱动波形以测量第二逻辑量子比特的状态。

[0020] 一些实施方式涉及一种操作电路量子电动力学系统的方法,该电路量子电动力学系统包括色散耦合至第一逻辑量子比特的第一辅助量子比特、色散耦合至第二逻辑量子比特的第二辅助量子比特、和第三逻辑量子比特,第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特由第一分束器耦合,并且第二逻辑量子比特和第三逻辑量子比特由第二分束器耦合。方法包括:在第一逻辑量子比特中制备任意逻辑状态;在第二逻辑量子比特与第三逻辑量子比特之间制备贝尔态;以及通过将任意逻辑状态从第一逻辑量子比特隐形传送到第三逻辑量子比特,来对任意逻辑状态执行纠错,隐形传送包括:使用第一分束器在第一逻辑量子比特与

第二逻辑量子比特之间引入干扰,以及在使用第一分束器之后,使用第一辅助量子比特和第二辅助量子比特执行第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特的状态的至少一次测量。

[0021] 在一些实施方式中,制备贝尔态包括:在第二逻辑量子比特中制备第一相干态;在第三逻辑量子比特中制备第二相干态;以及对第二逻辑量子比特和第三逻辑量子比特执行一系列联合奇偶性测量。

[0022] 一些实施方式涉及一种电路量子电动力学系统,该电路量子电动力学系统包括:辅助量子比特;以及多个逻辑量子比特,所述多个逻辑量子比特包括色散耦合至辅助量子比特的第一逻辑量子比特,以及由分束器耦合至第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特。

[0023] 在一些实施方式中,辅助量子比特包括超导传输子量子比特。

[0024] 在一些实施方式中,第二逻辑量子比特包括多个逻辑量子比特。

[0025] 在一些实施方式中,多个逻辑量子比特中的逻辑量子比特包括玻色子模式。

[0026] 在一些实施方式中,系统还包括至少一个控制器,所述至少一个控制器被配置成:在第一逻辑量子比特中制备任意逻辑状态;在第二逻辑量子比特与第三逻辑量子比特之间制备贝尔态;以及通过将任意逻辑状态从第一逻辑量子比特隐形传送到第三逻辑量子比特,来对任意相干态执行纠错,隐形传送包括:使用至少一个分束器在逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间引入干扰;以及在使用至少一个分束器之后,使用第一辅助量子比特和第二辅助量子比特执行第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特的状态的至少一次测量。

附图说明

[0027] 参照以下附图描述各个方面和实施方式。附图不一定按比例绘制。为了清楚起见,并非每个部件均可以在每个附图中标记。在附图中:

[0028] 图1是根据本文所述技术的一些实施方式的说明性量子信息处理系统的示意图。

[0029] 图2是根据本文所述技术的一些实施方式的另一说明性量子信息处理系统的示意图。

[0030] 图3A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于量子比特中的 $|+\rangle$ 态的容错制备的说明性量子电路的示意图。

[0031] 图3B是根据本文所述技术的一些实施方式的可以用于实现图3A的量子电路的说明性量子信息处理系统的示意图。

[0032] 图3C是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行奇偶性测量的说明性量子电路的示意图。

[0033] 图3D是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行图3C的奇偶性测量的说明性驱动波形的示意图。

[0034] 图4A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于量子比特中的 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 态的容错制备的说明性量子电路的示意图。

[0035] 图4B是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行Z测量的说明性量子电路的示意图。

[0036] 图4C是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行图4B的Z测量的说明性驱动波形的示意图。

[0037] 图5是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行Z基容错测量的说明性量子

电路的示意图。

[0038] 图6是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行X基容错测量的说明性量子电路的示意图。

[0039] 图7是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行XX基容错测量的说明性量子电路的示意图。

[0040] 图8A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行ZZ基容错测量的说明性量子电路的示意图。

[0041] 图8B是根据本文所述技术的一些实施方式的用于实现图8A的量子电路的说明性量子信息处理系统的示意图。

[0042] 图8C是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行ZZ测量的说明性量子电路的示意图。

[0043] 图8D是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行图8B的ZZ测量的说明性驱动波形的示意图。

[0044] 图9A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行ZZZ基容错测量的说明性量子电路的示意图。

[0045] 图9B是根据本文所述技术的一些实施方式的用于实现图9A的量子电路的说明性量子信息处理系统的示意图。

[0046] 图9C是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行ZZZ测量的说明性量子电路的示意图。

[0047] 图9D是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行图9C的ZZZ测量的说明性驱动波形的示意图。

[0048] 图10是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行量子操作的过程1000的流程图。

[0049] 图11是根据本文所述技术的一些实施方式的用于制备贝尔态的说明性量子电路的示意图。

[0050] 图12是根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行隐形纠正 (telecorrection) 的说明性量子电路的示意图。

[0051] 图13是根据本文所述技术的一些实施方式的用于制备Greenberger-Horne-Zeilinger簇(cluster)态的说明性量子电路的示意图。

[0052] 图14是根据本文所述技术的一些实施方式的用于制备GHZ簇态的另一说明性量子电路的示意图。

[0053] 图15是根据本文所述技术的一些实施方式的用于制备 $|\chi\rangle$ 态的说明性量子电路的示意图。

[0054] 图16是根据本文所述的一些实施方式的用于隐形传送CNOT门的说明性量子电路的示意图。

[0055] 图17A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于制备 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 态的简化量子电路的示意图。

[0056] 图17B是根据本文所述技术的一些实施方式的图17A的量子电路的详细示意图。

[0057] 图18是根据本文所述技术的一些实施方式的被配置成隐形传送哈达玛

(Hadamard)门的量子电路的示意图。

[0058] 图19是根据本文所述技术的一些实施方式的用于在第一量子比特与第二量子比特之间进行SWAP测试的容错实现的说明性量子电路的示意图。

[0059] 图20是根据本文所述技术的一些实施方式的被配置成减少以四个量子比特制备的量子态中存在的错误的说明性量子电路的示意图。

[0060] 图21是根据本文所述技术的一些实施方式的示出克尔效应(Kerr effect)和 χ' 对量子态的影响的示意图。

[0061] 图22A是示出根据本文所述技术的一些实施方式的使用频率梳生成的驱动波形的示例的曲线图。

[0062] 图22B是示出根据本文所述技术的一些实施方式的图22A的驱动波形的傅立叶(Fourier)变换的曲线图。

[0063] 图23A是示出根据本文所述技术的一些实施方式的使用频率梳生成的驱动波形的另一示例的曲线图。

[0064] 图23B是示出根据本文所述技术的一些实施方式的图23A的驱动波形的傅立叶变换的曲线图。

[0065] 图24是描述根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行量子操作的另一过程2400的流程图。

[0066] 图25A是根据本文所述技术的一些实施方式的被配置成以两个量子比特制备贝尔态的另一说明性量子电路的示意图。

[0067] 图25B是根据本文所述技术的一些实施方式的可以使用图25A的量子电路来制备的双量子比特ZZ贝尔态簇态的示意图。

[0068] 图26A是根据本文所述技术的一些实施方式的被配置成制备四量子比特簇态的另一说明性量子电路的示意图。

[0069] 图26B是根据本文所述技术的一些实施方式的可以使用图26A的量子电路来制备的四量子比特簇态的示意图。

[0070] 图27A是根据本文所述技术的一些实施方式的被配置成生成双量子比特纠缠态的另一量子电路的示意图。

[0071] 图27B是根据本文所述技术的一些实施方式的可以使用图27A的量子电路来制备的双量子比特纠缠态的示意图。

[0072] 图28A是描述根据本文所述技术的一些实施方式的生成另一四量子比特簇态的另一过程的示意图。

[0073] 图28B是描述根据本文所述技术的一些实施方式的XZZX簇态的形成的示意图。

[0074] 图29是根据本文所述技术的一些实施方式的说明性常规计算机系统的示意图。

具体实施方式

[0075] 在试验室中已经成功地论证了若干不同类型的量子比特。然而,在由于量子态的退相干或由于其他量子噪声而导致信息损失之前这些系统中的很多系统的状态的寿命目前为大约100 μ s。尽管寿命较长,但是在使得能够实现对量子系统中存储的信息的可靠存储和检索的量子计算中提供纠错技术会非常重要。然而,与出于纠错目可以复制比特的传统

计算系统不同,克隆量子系统的未知状态是不可能的。然而,该系统可以与将系统中的信息有效地传播在若干纠缠的对象上的其他量子系统纠缠在一起。

[0076] 本申请涉及用于纠正展现一个或更多个玻色子模式的量子系统的状态的错误的改进的量子纠错技术。在该上下文中,“错误”是指可能由例如玻色子损失、玻色子获得、退相、系统的时间演化等导致的量子系统的状态的变化,并且“错误”改变系统的状态使得系统中所存储的信息被改变。

[0077] 如上所述,量子多级系统例如量子比特展现基于当前的试验实践在大约100 μ s内退相干的量子态。因此,将多级系统与展现更长的退相干时间的另一系统耦合起来可能是有益的。如下面将描述的,玻色子模式对于耦合至多级系统特别理想。通过这种耦合,多级系统的状态可以替代地由玻色子模式表示,从而与以其他方式单独存在于多级系统中相比将以更长久的状态保持相同的信息。

[0078] 玻色子模式中存储的量子信息可能仍然具有有限的寿命,使得在玻色子系统内仍然会发生错误。因此,当在其状态中发生错误时,会期望操纵玻色子系统以有效地纠正这些错误,并且因此重新获得系统的先前状态。如果可以纠正广泛类型的错误,则可以通过纠正可能发生的任何类型的错误而无限期地(或至少长时间段地)保持玻色子系统的状态。

[0079] 腔量子电动力学(腔QED)和电路QED的领域表示实现量子纠错的一个说明性试验方法。在这些方法中,一个或更多个量子比特系统以如下方式各自耦合至谐振器腔,该方式使得允许将量子比特中包含的量子信息映射至谐振器和/或从谐振器进行映射。谐振器通常比量子比特具有更长的稳定寿命。稍后可以通过将状态从各个谐振器映射回到量子比特来在量子比特中检索量子态。

[0080] 当多级系统例如量子比特被映射至与其耦合的玻色子系统的状态时,必须选择在玻色子系统中对量子比特状态进行编码的特定方法。这种对编码的选择通常简称为“代码”。

[0081] 作为示例,代码可以使用谐振器的零玻色子数态表示量子比特的基态,并且使用谐振器的一玻色子数态表示量子比特的激发态。即:

$$[0082] \quad (\alpha|g\rangle + \beta|e\rangle) \otimes |0\rangle \rightarrow |g\rangle \otimes (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$$

[0083] 其中, $|g\rangle$ 是量子比特的基态, $|e\rangle$ 是量子比特的激发态, α 和 β 是分别表示处于态 $|g\rangle$ 或 $|e\rangle$ 的量子比特的概率幅度的复数,以及 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 分别是谐振器的零玻色子数态和一玻色子数态。虽然这是完美有效的代码,但是其对于很多错误例如玻色子损失不是鲁棒的。即,当发生玻色子损失时,可能无法使用该代码恢复玻色子损失之前谐振器的状态。

[0084] 可以将对代码的使用更一般地写为:

$$[0085] \quad (\alpha|g\rangle + \beta|e\rangle) \otimes |0\rangle \rightarrow |g\rangle \otimes (\alpha|W_{\downarrow}\rangle + \beta|W_{\uparrow}\rangle)$$

[0086] 其中, $|W_{\downarrow}\rangle$ 和 $|W_{\uparrow}\rangle$ 被称为逻辑码字(或简称为“码字”)。对代码的选择——等效地,选择如何以玻色子系统的状态编码两级系统(例如,量子比特)的状态——因此包括针对 $|W_{\downarrow}\rangle$ 和 $|W_{\uparrow}\rangle$ 来选择值。

[0087] 当发生错误时,系统的状态转变为所得状态、本文称为“错误字” $|E_{\downarrow}^k\rangle$ 和 $|E_{\uparrow}^k\rangle$ 的叠加,如下所示:

$$[0088] \quad \alpha|W_{\downarrow}\rangle + \beta|W_{\uparrow}\rangle \rightarrow \alpha|E_{\downarrow}^k\rangle + \beta|E_{\uparrow}^k\rangle$$

[0089] 其中,索引k指的是已发生的特定错误。如上所述,错误的示例包括玻色子损失、玻色子获得、退相、幅度衰减等。通常,对代码的选择会影响系统对错误的鲁棒性。即,当发生错误时,所使用的代码确定了可以在多大程度上保真地恢复先前的状态。理想的代码将与广泛类型的错误相关联,这样当发生任何错误时信息不会损失,并且可以保真地恢复逻辑码字的任何量子叠加。

[0090] 然而,上述方法面临的一个挑战是,代码可能会受到玻色子系统的量子控制所需的非线性辅助的寿命的限制。通常情况下,控制玻色子系统,并且通过操纵耦合至玻色子系统的辅助量子比特来纠正玻色子系统中的错误。然而,这可能意味着,当辅助量子比特中发生错误时,玻色子系统的状态的纠错也许不再可能。

[0091] 发明人已经认识并领会到,四脚猫代码可以为在硬件高效量子计算系统中执行量子计算操作提供容错平台。特别地,发明人开发了用于基于逻辑量子比特和/或辅助量子比特测量的四脚猫代码的操作的通用集合。该通用门集保持了对逻辑量子比特和辅助量子比特中最可能出现的一阶错误(包括辅助衰变和退相)的容错性。

[0092] 发明人开发了基于玻色子系统的容错奇偶性操作的通用操作的集合。特别地,发明人扩展了容错奇偶性测量的使用,使得可以在四脚猫代码中对Z、ZZ和ZZZ逻辑算符进行非破坏性和容错性测量。这些逻辑算符的实现包括在辅助处于叠加状态时进行失谐分束器相互作用以测量这些算符。在一些实施方式中,即使当辅助直接耦合至多个逻辑量子比特中的仅一个逻辑量子比特时,也可以测量ZZ和ZZZ算符。

[0093] 发明人使用容错奇偶性测量和上文讨论的扩展,还开发了用于在四脚猫代码中制备Z和X本征态、贝尔态和GHZ态的方法。此外,发明人还开发了通过结合分束器和腔光子数的测量,以Z、X、ZZ和XX逻辑基执行鲁棒测量的方法。例如,X测量的实现利用分束器相互作用,使用相干态对逻辑状态的干涉。此后,向辅助量子比特施加光子数选择性驱动波形,以确定逻辑量子比特之一(例如腔)是否处于真空状态。在可以通过重复测量并对结果进行多数投票指数级地抑制总体测量错误的意义上,这些测量对所有阶的超导传输子衰变和退相错误都具有容错性。

[0094] 发明人还认识并领会到,结合腔位移操作,该算符的集合足以进行四脚猫代码中的Clifford操作,同时保持对量子错误的一阶容错性。为了使该集合通用,发明人开发了包括容错SNAP门以实现任意单量子比特Z旋转的操作,或者替代地,包括通过蒸馏方案在单量子比特布洛赫球(Bloch sphere)上制备高保真任意态的操作。这将涉及生成目标态的N个不完全副本,并且通过在所有可能的副本对之间执行非破坏性容错SWAP测试,对副本进行成对比较。在通过所有SWAP测试后进行后选择,从而得到目标态的保真度高于与初始态的保真度的状态的N个副本。

[0095] 发明人还认识并领会到,单光子损失和无跃迁反作用可以通过隐形传送方案(“隐形纠正”)在四脚猫代码中得到纠正。该方案可以分为两部分:创建合适的纠缠贝尔对;以及在贝尔基上进行测量。发明人相应地开发了用于针对四脚猫代码生成贝尔态并且执行贝尔测量的技术。这样的贝尔态于是用于纠正无跃迁反作用,并且贝尔测量进行隐形传送,同时针对单光子损失进行纠正。

[0096] 根据一些实施方式,本文所描述的代码可以被用于配置玻色子系统的状态。玻色子系统可以是其中应用本文所描述的技术的特别理想的系统,因为单个玻色子模式可以展现相干态的等距间隔。例如,谐振器腔是具有等距水平间隔的简谐振荡器。玻色子模式也有助于量子通信,因为对于量子存储器而言它们可以是静止的,或者有助于与常规量子比特相互作用,或者它们可以传播(“飞行”)用于量子通信(例如,它们可以从谐振器被捕获和释放)。

[0097] I. 说明性硬件实现方式

[0098] 图1描绘了适用于实践本申请的各个方面的说明性系统100。在系统100中,量子系统101包括经由色散耦合而耦合至逻辑量子比特120的辅助量子比特110。也就是说,辅助量子比特到逻辑量子比特的失谐比辅助量子比特110和逻辑量子比特120之间的耦合强度大得多(例如,大一个数量级)。逻辑量子比特120还由分束器130(例如,可编程分束器)耦合至逻辑量子比特140。能量源150可以向辅助量子比特110、逻辑量子比特120、分束器130和/或逻辑量子比特140中的一个或两个提供能量,以便对系统执行操作,例如在逻辑量子比特120和/或140中的任何一个中制备状态,测量逻辑量子比特120和/或140中的一个或多个、对逻辑量子比特120和/或140中的一个或多个应用门操作,对辅助量子比特110应用操作或在辅助量子比特110中制备状态,检测和/或纠正辅助量子比特110和/或逻辑量子比特120和/或140中的错误,或上述的组合。

[0099] 根据一些实施方式,逻辑量子比特120和逻辑量子比特140可以实现为任何合适的多模玻色子系统。虽然这可以包括光子系统,如一个或多个微波腔,但本文所述的技术不限于这样的系统。逻辑量子比特120和逻辑量子比特140可以实现为多模玻色子系统,多模玻色子系统可以包括单个玻色子系统的多个模式和/或多个玻色子系统的单个模式的任何组合。

[0100] 根据一些实施方式,辅助量子比特110可以包括具有三种不同状态的任何合适的量子系统,例如但不限于基于超导约瑟夫森结(Josephson junction)的量子系统,如电荷量子比特(库珀对盒子(Cooper-pair box))、通量量子比特或相位量子比特、超导传输量子比特或其组合。辅助量子比特110可以经由色散耦合而耦合至逻辑量子比特120,该色散耦合将辅助量子比特110的状态耦合至逻辑量子比特120的状态。逻辑量子比特120可以包括支持多个玻色子模式的任何玻色子系统,其可以使用任何电磁、机械、磁性(例如,也称为磁振子的量子化自旋波)和/或其他技术例如但不限于任何腔谐振器(例如微波腔)来实现。根据一些实施方式,逻辑量子比特120可以包括多个传输线谐振器。

[0101] 根据一些实施方式,分束器130可以被配置成在逻辑量子比特120与一个或多个逻辑量子比特140之间提供可切换的分束器相互作用。例如,每个分束器130可以在逻辑量子比特120与逻辑量子比特140之一之间致动形式为 $H = g(a_1^\dagger a_2 + a_1 a_2^\dagger)$ 的哈密顿量。分束器130可以使用例如超导微波电路来实现,该超导微波电路包括但不限于具有参数驱动的超导传输子的四波混合以及/或者具有超导非线性非对称电感元件子(element-mon) (“SNAILmon”)或者通量泵DC超导量子干涉器件(“SQUID”)的三波混合。

[0102] 系统100还包括能量源150、控制器160和存储介质170(例如,计算机可读存储介质)。在一些实施方式中,预先计算的驱动波形的库172可以存储在存储介质170上并且由控

制器160访问,以便向量子系统101施加所述波形。例如,控制器160可以(例如,响应于提供给控制器的用户输入)访问存储在存储介质170上的驱动波形172,并且此后控制能量源150分别向辅助量子比特110、逻辑量子比特120、分束器130和/或逻辑量子比特140施加一个或更多个驱动波形。

[0103] 如本文所使用的,施加这样的电磁信号或脉冲也可以称为“驱动”辅助量子比特和/或逻辑量子比特。耦合可以利用任何技术来耦合辅助量子比特和逻辑量子比特,例如通过耦合由辅助量子比特和逻辑量子比特产生的电场和/或磁场。根据一些实施方式,辅助量子比特(例如超导传输子)可以经由压电耦合而耦合至作为机械谐振器的逻辑量子比特。根据一些实施方式,可以通过将辅助量子比特(例如超导传输子)耦合至声子——声子又经由磁致伸缩耦合而耦合至磁振子——来将辅助量子比特耦合至作为磁谐振器的逻辑量子比特。

[0104] 图2描绘了适用于实践本申请的各个方面的备选说明性系统。在系统200中,量子系统201包括经由色散耦合而耦合至逻辑量子比特140的辅助量子比特110。逻辑量子比特140还由分束器130耦合至其他逻辑量子比特140。分束器130能够切换为打开和关闭任何一对逻辑量子比特140之间的分束器相互作用。能量源150可以向辅助量子比特110、分束器130和/或逻辑量子比特140中的一个或两个提供能量,以对系统执行操作,例如在任何一个逻辑量子比特140中制备状态,测量一个或更多个逻辑量子比特140的状态,对一个或更多个逻辑量子比特140应用门操作,对辅助量子比特110应用操作,检测和纠正辅助量子比特110和/或逻辑量子比特140中的错误,或其组合。

[0105] II. 用于四脚猫代码的操作

[0106] 玻色子量子计算将量子信息编码在简谐振荡器的自由度中。通过这种方式,可以以硬件高效的方式实现量子纠错。也就是说,发生在振荡器中的量子错误不需要太多附加的物理硬件就能得到纠正。一个这样的编码就是四脚猫代码,四脚猫代码被设计成纠正振荡器中的单光子损失错误,所述振荡器是一些量子系统(如量子电动力学电路系统)中的主要错误通道。

[0107] 为了将这种编码用作量子存储器,需要在适当的码字中制备逻辑状态,检测并纠正单光子损失错误,并且随后从量子系统中读出逻辑信息。为了进一步将这种编码用于量子计算,必须附加地实现通用门集。

[0108] 如果没有对简谐振荡器的量子控制,量子存储器或计算则都不可能实现。为了利用经典外部驱动实现对简谐振荡器的量子控制,可以将非线性的源添加至系统。例如,可以将辅助量子比特(如超导传输子量子比特)添加至系统,该辅助量子比特色散耦合至简谐振荡器(例如,微波腔谐振器)。遗憾的是,辅助量子比特可能是可以传播至存储在简谐振荡器中的信息的错误的附加源。

[0109] 由于由辅助量子比特产生的这些错误具有量子性质,因此可以将其描述为跃迁算符。虽然可能出现的量子错误无穷无尽,但在错误纠正步骤之间的时间窗内,对这种腔-超导传输子系统中可能出现的最可能出现的错误进行纠正会显著提高计算性能。这样的错误包括简谐振荡器中的单光子损失、辅助量子比特中的激发的单衰变和/或辅助量子比特存储的状态的退相。该错误的集合可以简洁地概括为:

[0110] $\{1, \hat{a}, |g\rangle\langle e|, |e\rangle\langle e|\}$

[0111] 其中, $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 是辅助量子比特的前两级,以及 \hat{a} 是简谐振荡器的湮灭算符。对于三级辅助量子比特,存在类似的错误集合:

$$[0112] \quad \{\mathbb{1}, \hat{a}, |e\rangle\langle f|, |f\rangle\langle f|\}$$

[0113] 其中, $|f\rangle$ 是辅助量子比特的第三级。

[0114] 如果量本文所述的子操作被设计成当上述错误中之一发生时,不会导致在简谐振荡器中的量子比特出现逻辑错误,则操作对这些错误具有容错性。要满足这一条件,要么可以在稍后时间纠正错误,要么错误对存储在简谐振荡器中的逻辑信息的影响可以忽略不计。

[0115] 发明人已经认识并领会到,利用四脚猫代码实现通用量子计算所需的这种容错水平可以在基于测量的量子计算(MBQC)范式中实现。在电路模型量子计算中,将门应用于在整个计算过程中保持固定的量子比特。相比之下,MBQC通过以纠缠资源态制备量子比特来进行,所述纠缠资源态包括多体纠缠态,即所谓的“簇态”。然后,可以通过测量特定基数中的量子比特来利用簇态执行计算。量子操作不是直接实现逻辑门,而是可以划分为量子态的制备和破坏性测量;然后使用这些操作来实现量子门和量子纠错。

[0116] 在四脚猫代码中实现容错量子计算的第一量子操作是简谐振荡器(例如,与本文中结合图1或图2所述的逻辑量子比特120或140)中的状态制备。图3A是根据本文所述技术的一些实施方式的用于量子比特中的 $|+\rangle$ 状态的容错制备的说明性量子电路300的示意图。

[0117] 在一些实施方式中,量子电路300以从左向右阅读的顺序描述了应用于单个量子比特的操作。在最左边,量子比特开始处于真空状态($|\text{vac}\rangle$)。此后,可以应用位移302(D(α))将量子比特的状态位移到相干态(例如, $\alpha=2$ 至3)。在将量子比特的状态进行位移之后,可以重复执行奇偶性测量304。通过要求重复的奇偶性测量获得相同的测量结果,实现了对辅助错误的容错。如果每次奇偶性测量304获得不同的结果,则推断发生了错误,并且可以丢弃该状态。通过要求两个测量结果一致,可以制备对错误集合具有容错性的状态 $|\alpha\rangle \pm |-\alpha\rangle$ 。

[0118] 在一些实施方式中,可以使用图3B所示的说明性量子信息处理系统310来实现量子电路300。量子信息处理系统310包括描绘为微波腔谐振器的逻辑量子比特312。逻辑量子比特312色散耦合至辅助超导传输子量子比特314。读出谐振器316(例如,微波条带谐振器(microwave strip resonator))耦合至辅助超导传输子量子比特314,并且被配置成向辅助超导传输子量子比特314提供输入以及/或者从辅助超导传输子量子比特314读出信息。

[0119] 在一些实施方式中,如图3C的示例中所描绘,奇偶性测量304可以被描述为应用于辅助量子比特和逻辑量子比特的量子操作序列。在图3C的量子电路中,辅助量子比特 $|g\rangle$ 被描绘在逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle$ 下方的行上。量子操作包括辅助量子比特的第一 $\pi/2$ 旋转304a、应用于逻辑量子比特的酉操作304b、辅助量子比特的第二 $-\pi/2$ 旋转304c以及辅助量子比特的状态的测量304d。

[0120] 如图3D的示例中所示,这些量子操作可以通过对辅助量子比特施加一系列320驱动波形来物理地实现。该系列320包括:第一序列322a,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $g-e\pi/2$ 脉冲和 $e-f\pi$ 脉冲;以及随后的第二序列322b,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $e-f\pi$ 脉冲和 $g-e\pi/2$ 脉冲。序列322a和322b被时间延迟 $T_{\Pi}=\pi/\chi$ 间隔开。在序列322b完成之后,执行辅助量子比特的状态的读出324。

[0121] 图4A中描绘了在四脚猫代码中执行状态制备的另一量子操作。在图4A的示例中,根据一些实施方式,量子电路400被配置成制备四脚猫状态 $|a\rangle \pm |i\alpha\rangle + |a\rangle \pm |-i\alpha\rangle$,该四脚猫状态用作四脚猫代码的逻辑0和1码字。量子电路400从逻辑量子比特处于真空状态($|\text{vac}\rangle$)开始。此后,如结合图3A所述,可以应用位移302 ($D(\alpha)$)。为了容错地制备四脚猫状态,可以按照图4A中描绘的顺序应用一系列奇偶性测量304和逻辑Z测量406。

[0122] 在一些实施方式中,逻辑Z测量406可以通过测量逻辑量子比特的4奇偶性来实现。该测量确定逻辑量子比特是否包含0、4、8等光子或2、6、10等光子。如果量子比特包含0、4、8等光子,则测量产生+1的结果;但是如果量子比特包含2、6、10等光子,则测量产生-1的结果。如果量子比特包含奇数光子,则测量产生随机结果。通过要求以下再次实现容错:奇偶性测量304对和逻辑Z测量406对一致,以用于成功的状态制备尝试。

[0123] 在一些实施方式中,逻辑Z测量406可以描述为应用于辅助量子比特和逻辑量子比特的量子操作序列,如图4B的示例中描绘的。逻辑Z测量406与奇偶性测量304的不同之处在于,酉操作406b的执行等待时间($T_{4\pi} = \pi/2\chi = T_{\pi}/2$)是与结合图3B所述的酉操作304b的一半。类似地,如图4C中所描绘的,一系列驱动波形410与一系列驱动波形320的波形相同,唯一的变化是第一序列322a与第二序列322b之间的等待时间为 $T_{4\pi} = \pi/2\chi$ 。

[0124] 除了制备逻辑量子比特中的状态外,还必须测量逻辑量子比特的状态,作为量子计算实现的一部分。图5是根据本文所述技术的一些实施方式的示意性量子电路500的示意图,该量子电路500用于在四脚猫代码的Z基中执行容错测量。量子电路500包括逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle$ 的测量502。这种测量502可能是破坏性的,因为当在测量502期间发生衰变错误时,测量502会使存储在逻辑量子比特中的状态退相。在这种情况下,虽然存储在逻辑量子比特中的状态此后不能用于进一步的逻辑操作,但可以继续测量,以通过重复测量结果的多数投票来提高整体测量保真度。

[0125] 在一些实施方式中,四脚猫代码的Z基中的测量502可以通过对辅助量子比特应用优化控制脉冲来物理地实现,以在且仅在逻辑量子比特包含 $n=0, 3, 4, 7, 8, \dots$ 光子的情况下激发辅助量子比特。替选地,可以用适当频率的选择性 π 脉冲的线性组合来驱动辅助量子比特,以实现测量502。

[0126] 图6是根据一些实施方式的说明性量子电路600的示意图,该量子电路600用于在四脚猫代码的X基中执行容错测量。为了在X基中执行容错测量,量子电路600包括对辅助逻辑量子比特的使用,如电路图的下线所示。辅助逻辑量子比特可以从真空状态($|\text{vac}\rangle$)开始,并且此后可以通过位移602 ($D(\alpha)$) (例如,如结合图3C的位移302所述)在相干态下进行制备。通过相干态与逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle$ 的状态之间的分束器干涉604,X基中的测量在 $|\alpha\rangle \pm |-\alpha\rangle$ 状态与 $|i\alpha\rangle \pm |-i\alpha\rangle$ 状态之间进行区分。测量606和608 (例如,使用选择性 π 脉冲实现)确定逻辑量子比特和辅助量子比特中是否只有一个包含0光子。如果逻辑量子比特和辅助量子比特中恰好有一个包含0光子,则可以知道输入状态是 $|\alpha\rangle \pm |-\alpha\rangle$,因为当输入状态为 $|i\alpha\rangle \pm |-i\alpha\rangle$ 时,只有 $e^{-|\alpha|^2}$ 的概率。这是内在错误概率,如果 α 足够大,则该内在错误概率可能非常小。与Z基中的测量502一样,X基中的测量600也可以通过重复测量和使用多数投票来实现容错。

[0127] 图7是根据一些实施方式的说明性量子电路700的示意图,该量子电路700用于在四脚猫代码的XX基中执行容错测量。XX基中的容错测量与结合图6所述的测量600非常相

似。量子电路700的测量不使用逻辑量子比特和辅助量子比特,而是从两个逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 开始。如果通过测量606和608测得其中一个逻辑量子比特包含0光子,则这指示两脚猫在相空间中沿同一方向对准。

[0128] 图8A是根据一些实施方式的说明性量子电路800的示意图,该量子电路800用于在四脚猫代码的ZZ基中执行容错测量。在一些实施方式中,量子电路800包括对两个逻辑量子比特的联合4奇偶性的测量802。

[0129] 测量两个逻辑量子比特的联合4奇偶性的一种方式使辅助量子比特耦合至存储在逻辑量子比特中的单腔模式。然后,可以在不测量任何状态的情况下执行单模式4奇偶性测量序列。然后,如结合本文中的图19所述,应用SWAP操作,然后进行另一单模式4奇偶性测量。此后,可以在X基中测量辅助量子比特,并且执行另一SWAP操作。然而,这一过程面临的限制是,分束器率通常小于 χ ,使得在SWAP操作期间需要消除 χ 。

[0130] 避免这一问题的更快序列是将SWAP操作和色散哈密顿量合并为实现联合4奇偶性测量的单个操作。为了了解其工作原理,首先要注意的是,联合4奇偶性算符是将腔相位空间联合旋转90度: $\Pi_4 = e^{i\frac{\pi}{2}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)}$ 。为了测量该算符,可以在两个 $\pi/2$ 脉冲之间应用受控的联合腔旋转,然后读出辅助量子比特。该门的对称版本可以写为:

$$[0131] \quad U_t = e^{-i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |e\rangle\langle e|$$

[0132] 或等同于:

$$[0133] \quad U_t = e^{-i\frac{3\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{3\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |e\rangle\langle e|$$

[0134] 注意,每次执行该测量时,都存在无条件的联合腔相位旋转 $\pi/4$ 或 $3\pi/4$,这可以通过软件进行跟踪。利用正确的定时以及 χ 与 g 的比率,可以从哈密顿量产生任一酉元(unitary):

$$[0135] \quad H_t = ga_1^\dagger a_2 + h.c. + \frac{\pi}{2} \sigma_z a_1^\dagger a_1$$

[0136] 对于给定的 χ 的值,两个第一操作点被设置为 $g = \sqrt{\frac{15}{16}}\chi$ 或 $g = \sqrt{\frac{7}{144}}\chi$ 。然后,

上述哈密顿量可以应用于时间 $t = \frac{\pi}{\sqrt{g^2 + \chi^2}}$ 。

[0137] 这些特定的比率可以实现期望的酉元。可以使该测量与结合图3A至图3D所述的容错奇偶性测量的方法一样,对超导传输子错误进行容错。当使用 χ 匹配测量 $|e\rangle$ 时,使用辅助量子比特的 g - f 流形允许检测超导传输子衰变错误。即使存在单个超导传输子衰变,这种测量也不会使腔退相。光子损失是可以纠正的,前提是使用奇偶性测量来跟踪奇偶性,并且在下一次奇偶性跃迁发生之前相应地更新4奇偶性测量。例如,如果腔是奇数,则可以通过向最后的 $\pi/2$ 脉冲添加 90° 相位偏移,在 y 基中读出辅助量子比特。

[0138] 返回到图8A,联合4奇偶性的测量802确定两个逻辑量子比特中存在的光子的总数例如是 $n=0, 4, 8, \dots$ 或 $n=2, 6, 10, \dots$ 。如结合图3A至图3D所述,在测量802之后,对每个逻辑量子比特执行奇偶性测量304。这些奇偶性测量304用于确定逻辑量子比特中的任何一个

否发生了光子损失。

[0139] 在一些实施方式中,量子电路800可以使用图8B所示的说明性量子信息处理系统810来实现。量子信息处理系统810包括第一逻辑量子比特812a和第二逻辑量子比特812b。第一逻辑量子比特812a和第二逻辑量子比特812b两者都可以是微波腔谐振器,如图8B的示例中描绘的。第一逻辑量子比特812a和第二逻辑量子比特812b由分束器814相互耦合。第一逻辑量子比特812a色散耦合至辅助超导传输子量子比特816。读出谐振器818(例如,微波条带谐振器)耦合至辅助超导传输子量子比特816,并且被配置成向辅助超导传输子量子比特906提供输入以及/或者从辅助超导传输子量子比特816读出信息。

[0140] 在一些实施方式中,两个逻辑量子比特的联合4奇偶性的测量802可以描述为应用于辅助量子比特和两个逻辑量子比特的量子操作的序列,如图8C的示例中描绘的。在图8C的量子电路中,对辅助量子比特 $|g\rangle$ 的操作描绘在逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 下方的行上。存储状态 $|\psi_{L1}\rangle$ 的逻辑量子比特是色散耦合至辅助量子比特的逻辑量子比特,而逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 由分束器耦合,如结合图8B的示例所述。量子操作包括:辅助量子比特的第一 $-\pi/2$ 旋转802a,应用于逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 的分束器操作802b,辅助量子比特的第二 $-\pi/2$ 旋转802c,以及辅助量子比特的状态的测量802d。

[0141] 如图8D的示例中所示,图8C的量子操作可以通过对辅助量子比特应用一系列820驱动波形来物理地实现。该系列820包括:第一序列822a,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $g-e\pi/2$ 脉冲和 $e-f\pi$ 脉冲;以及随后的第二序列822b,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $e-f\pi$ 脉冲和 $g-e\pi/2$ 脉冲。序列822a和822b被时间延迟 $T_{ZZ} = \pi/\sqrt{g^2 + \chi^2/16}$ 间隔开。在该时间延迟 T_{ZZ} 期间,向耦合两个逻辑量子比特的分束器施加驱动波形,以进行失谐分束器相互作用,其具有以下形式的哈密顿量:

$$[0142] \quad H = g_{BS}(a_1 a_2^\dagger + a_1^\dagger a_2) + \Delta_{BS} a_1^\dagger a_1$$

[0143] 对于时间 T_{ZZ} ,其中 $\Delta_{BS} = \chi\sqrt{7}/12$ 以及 $g_{BS} = +x/2$ 。除了测量联合4奇偶性算符外,该序列还向存储在每个逻辑量子比特中的状态添加 -45° 的确定性旋转,该确定性旋转可以通过软件进行跟踪。在序列822b完成之后,执行辅助量子比特的状态的读出826。

[0144] 图9A是根据一些实施方式的说明性量子电路900的示意图,该量子电路900用于在四脚猫代码的ZZZ基中执行容错测量。量子电路900可视为量子电路800的扩展,并且包括3量子比特测量而非2量子比特测量。为了实现量子电路800的ZZ测量,使用 a_1 与 a_2 之间的可切换分束器相互作用以及色散耦合至 a_1 的三级辅助量子比特。为了将其扩展到量子电路900的ZZZ测量,可以在逻辑量子比特 a_1 与逻辑量子比特 a_3 之间添加附加的可切换分束器耦合,其中 a_3 是第三逻辑量子比特的场算符。 $\pi/2$ 脉冲之间的目标酉元为:

$$[0145] \quad U_{ZZZ} = e^{-i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |e\rangle\langle e|$$

[0146] 在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间以及然后在第一逻辑量子比特与第三逻辑量子比特之间以及然后是适当的等待时间,顺序地实现的两次成对分束器相互作用可以被用于进行上述酉元。

[0147] 执行这两个连续的成对分束器相互作用,得到以下酉元:

$$\begin{aligned}
U_{T_1}^{1,2} U_{T_1}^{1,3} &= \left(e^{-i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2)} \otimes |e\rangle\langle e| \right) \left(e^{-i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_3^\dagger a_3)} \right. \\
[0148] \quad &\quad \left. \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |e\rangle\langle e| \right) \\
&= e^{-i\frac{\pi}{4}(2a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(2a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |e\rangle\langle e|
\end{aligned}$$

[0149] 从该等式可以看出,第一逻辑量子比特已经积累了附加的条件相位。如果在执行这两次分束器相互作用之后进行测量,则算符 $\Pi_1 Z_2 Z_3$, 其中 Π 是第一逻辑量子比特的光子数奇偶性。为了抵消这一点,等待时间 $T = \pi / (2\chi)$ 产生以下酉元:

$$\begin{aligned}
U_{\text{wait}} U_{T_1}^{1,2} U_{T_1}^{1,3} &= \left(|g\rangle\langle g| + |e\rangle\langle e| e^{-i\frac{\pi}{2} a_1^\dagger a_1} \right) \left(e^{-i\frac{\pi}{4}(2a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |g\rangle\langle g| \right. \\
[0150] \quad &\quad \left. + e^{i\frac{\pi}{4}(2a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |e\rangle\langle e| \right)
\end{aligned}$$

[0151] 重新整理后可以得出:

$$[0152] \quad U_{\text{ZZZ}'} = U_{\text{wait}} U_{T_1}^{1,2} U_{T_1}^{1,3} = e^{-i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |g\rangle\langle g| + e^{i\frac{\pi}{4}(a_1^\dagger a_1 + a_2^\dagger a_2 + a_3^\dagger a_3)} \otimes |e\rangle\langle e|$$

[0153] 返回到图9A,在一些实施方式中,量子电路900可以使用图9B所示的说明性量子信息处理系统910来实现。量子信息处理系统910包括第一逻辑量子比特912a、第二逻辑量子比特912b和第三逻辑量子比特912c。如图9B的示例中描绘的,所有三个量子比特912a、912b和/或912c都可以是微波腔谐振器。第一逻辑量子比特912a和第二逻辑量子比特912b由分束器914a相互耦合。第一逻辑量子比特912a和第三逻辑量子比特912c通过另一分束器914b相互耦合。第一逻辑量子比特912a色散耦合至辅助超导传输子量子比特916。读出谐振器918(例如,微波条带谐振器)耦合至辅助超导传输子量子比特916,并且被配置成向辅助超导传输子量子比特916提供输入以及/或者从辅助超导传输子量子比特916读出信息。

[0154] 在一些实施方式中,三个逻辑量子比特的测量902可以描述为应用于辅助量子比特和三个逻辑量子比特的量子操作的序列,如图9C的示例中描绘的。在图9C的量子电路中,对辅助量子比特 $|g\rangle$ 的操作描绘在逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 、 $|\psi_{L2}\rangle$ 和 $|\psi_{L3}\rangle$ 下面的行上。存储状态 $|\psi_{L1}\rangle$ 的逻辑量子比特是色散耦合至辅助量子比特的逻辑量子比特,而成对的逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 以及 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L3}\rangle$ 各自由分束器耦合,如结合图9B的示例中所述。量子操作包括:辅助量子比特的第一 $\pi/2$ 旋转902a;应用于逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L2}\rangle$ 的分束器操作902b;应用于逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 和 $|\psi_{L3}\rangle$ 的第二分束器操作902c;应用于第一逻辑量子比特 $|\psi_{L1}\rangle$ 的酉操作902d;辅助量子比特的第二 $\pi/2$ 旋转902e以及辅助量子比特的状态的测量902f。

[0155] 如图9D的示例中所示,图9C的量子操作可以通过向辅助量子比特和分束器施加一系列920驱动波形来物理地实现。该系列920包括:第一序列922a,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $g - e\pi/2$ 脉冲和 $e - f\pi$ 脉冲;以及随后的第二序列922b,其包括驱动波形,该驱动波形包括 $e - f\pi$ 脉冲和 $g - e\pi/2$ 脉冲。序列922a和922b被时间延迟 $2T_{\text{ZZ}} + T_{4\pi}$ 间隔开。在该时间延迟 $2T_{\text{ZZ}} + T_{4\pi}$ 期间,向耦合成对的逻辑量子比特的两个分束器施加驱动波形,以进行失谐分束器相互作用,其具有上述形式的哈密顿量。长度为 $T_{4\pi}$ 的时间段可以被用于纠正存储在已经进行积累的逻辑量子比特中的状态的任何旋转(例如,分别对于第一逻辑量子比特、第二逻辑量子比特和第三逻辑量子比特的 -90° 、 -45° 和 -45°)。

[0156] 图9A至图9C的ZZZ测量完成四脚猫代码的Clifford门集,因为当与上述其他量子

操作进行组合时,其可以用于实现CNOT门。可以通过对可分离态 $|+++ \rangle$ 使用ZZZ测量来创建纠缠态 $|+++ \rangle + |--- \rangle$ 。对相同的初始态 $|+++ \rangle$ 测量成对的ZZ算符(例如 $Z_1 Z_2$ 和 $Z_2 Z_3$)可以创建类似的纠缠态 $|000 \rangle + |111 \rangle$ 。对这些状态的贝尔基测量可以确定性地实现CNOT门,直到局部泡利(Pauli)纠正,从而形成已知是通用的门集。

[0157] 图10是根据本文所述的一些实施方式的用于执行量子操作的过程1000的流程图。过程1000可以被用于操作例如包括电路量子电动力学部件的量子信息处理系统。量子信息处理系统可以包括耦合至第一逻辑量子比特(如微波腔谐振器)的辅助量子比特(如超导传输子量子比特、SNAILmon量子比特、振荡器或其他量子比特)。第一逻辑量子比特可以通过第一分束器耦合至第二逻辑量子比特。

[0158] 在一些实施方式中,过程1000包括向辅助量子比特和/或第一分束器施加一个或更多个驱动波形。驱动波形可以存储在一个或更多个计算机可读存储介质上(例如,本地地或远程地),并且可以由控制器访问。为了施加驱动波形,控制器可以使能量源(例如微波源)产生驱动波形,并且将驱动波形传输至辅助量子比特和/或第一分束器。

[0159] 在一些实施方式中,过程1000可以在动作1010处开始,其中,可以向辅助量子比特施加第一驱动波形。第一驱动波形可以包括 $\pi/2$ 脉冲。在一些实施方式中,第一驱动波形可以包括驱动波形的序列。例如,一系列驱动波形可以包括 $g - e\pi/2$ 脉冲和 $e - f\pi$ 脉冲。

[0160] 在一些实施方式中,在动作1010之后,过程1000可以进行到动作1020。在动作1020中,可以向第一分束器施加第二驱动波形,以在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。失谐分束器相互作用可以在 $T_{ZZ} = \pi/\sqrt{g^2 + \chi^2/16}$ 的时间延迟内进行。在该时间延迟 T_{ZZ} 期间,可以向耦合两个逻辑量子比特的分束器施加驱动波形,以进行失谐分束器相互作用,其具有以下形式的哈密顿量:

$$[0161] \quad H = g_{BS}(a_1 a_2^\dagger + a_1^\dagger a_2) + \Delta_{BS} a_1^\dagger a_1$$

[0162] 对于时间 T_{ZZ} ,其中 $\Delta_{BS} = \chi\sqrt{7}/12$ 以及 $g_{BS} = +\chi/2$ 。

[0163] 在一些实施方式中,在动作1020之后,过程1000可以进行到动作1030,其中,可以向辅助量子比特施加第三驱动波形。第三驱动波形可以包括 $\pi/2$ 脉冲。在一些实施方式中,第一驱动波形可以包括驱动波形的序列。例如,驱动波形的序列可以包括 $e - f\pi$ 脉冲和 $g - e\pi/2$ 脉冲。

[0164] 在一些实施方式中,在动作1030之后,过程1000可以进行到动作1040,其中,可以读出辅助量子比特的状态。在一些实施方式中,可以使用耦合至辅助量子比特的读出腔或微波条带谐振器读出辅助量子比特的状态。为了读出辅助量子比特的状态,可以对辅助量子比特的状态进行测量。例如,可以对辅助量子比特的状态进行破坏性测量。在一些实施方式中,例如可以使用能够在读出腔或微波条带谐振器的可能状态之间进行区分的微波辐射检测器进行该测量。例如,在一些实施方式中,微波辐射检测器可以是零差检测器或外差检测器。

[0165] III. 隐形纠正

[0166] 在标准量子隐形传送中,未知状态被“隐形传送”到新的物理系统。这种隐形传送可以使用两个步骤实现。首先,可以创建纠缠贝尔对。其次,执行贝尔基中的贝尔对中的一

半和未知状态的测量。直到已知的泡利纠正(取决于测量结果),未知状态会在该测量之后被确定性地传送到贝尔对中的另一半。

[0167] 长期以来都是四脚猫代码的突出难题的一个问题是所谓的“无跃迁”反作用,它会导致猫的“大小” α 随时间而减小。如果能够创建正确的贝尔态,则可以通过将量子信息隐形传送到具有更大 α 的新逻辑编码来缓解这种无跃迁反作用。例如,如果第一逻辑量子比特开始于 α_0 的猫大小,并且第一逻辑量子比特具有能量损失率 κ_c ,则在时间 t 之后,猫将缩小到有效的 $\alpha' = \alpha_0 e^{-\kappa_c t/2}$ 。

[0168] 通过在逻辑基中的 $\alpha = \alpha'$ 的量子比特和逻辑基中的 $\alpha = \alpha_0$ 的量子比特之间产生贝尔态,可以创建合适的贝尔态来纠正无跃迁反作用。图11的量子电路1100示出了根据一些实施方式的为此目的进行的贝尔态的容错制备。

[0169] 量子电路1100开始于在两个逻辑量子比特中制备两个任意状态。第一逻辑量子比特可以以位移1102($D_1(\alpha)$)进行位移,第二逻辑量子比特可以以位移1104($D_2(\beta)$)进行位移,从而在第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特中制备两个量子态。在一些实施方式中,第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特可以在不同逻辑基中使状态初始化。在图11的示例中,第一逻辑量子比特处于“大小”为 α 的猫代码中,而第二逻辑量子比特处于大小为 β 的猫代码中。在不同的逻辑基中制备两个逻辑量子比特使得能够纠正无跃迁反作用。

[0170] 此后,如结合图3A至图3D所述,可以执行两次奇偶性测量304,对第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特各执行一次。然后,量子电路1100可以继续两个连续的ZZ测量,如结合图8A至图9C所述。此后,可以对第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特中的每一个执行两次附加的奇偶性测量304。如本文所述,为确保贝尔态的容错生成,针对第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特中的每一个,第一奇偶性测量304和第二奇偶性测量304必须一致。此外,两个ZZ测量802也必须一致,以确保容错。

[0171] 然后,制备的贝尔态1100可以被用于通过在贝尔基中执行测量,对逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle_{\alpha}$ 执行隐形纠正,如图12的量子电路中所描绘的。首先,可以在贝尔态1100的第一量子比特(制备有大小为 α 的猫代码)与逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle_{\alpha}$ 之间进行分束器相互作用1202。然后,贝尔态1100的第一量子比特和逻辑量子比特二者都可以使用测量1204在四脚猫代码的Z基中进行测量。在一些实施方式中,测量1204可以等同于本文中结合图5所述的测量502。此后,贝尔态1100的第一量子比特和逻辑量子比特二者都可以使用测量1206在四脚猫代码的XX基中进行测量,该测量1206可以等同于本文中结合图6所述的测量606。然后,这些测量将原本存储在逻辑量子比特 $|\psi_L\rangle$ 中的量子信息隐形传送至贝尔态1100的第二量子比特(具有大小为 β 的猫代码),从而纠正无跃迁反作用并防止泄漏错误在多次量子操作中积累。

[0172] 由于分束器保留了总光子数奇偶性(即保留了光子数),因此仍然可以通过测量局部光子数奇偶性 $\text{mod}(4)$ 并且将结果相加以确定ZZ信息来提取ZZ信息。协议是容错的,因为在分束器之后,所有逻辑XX和ZZ信息都已映射到腔的非本地光子数空间。虽然在隐形纠正过程期间,辅助量子比特错误仍有可能使逻辑量子比特退相,但在任一腔中需要至少两个光子损失以产生不正确的测量结果。

[0173] 特别是对于量子计算的簇态模型,一个潜在有用的子例程是创建Greenberger-Horne-Zeilinger(GHZ)纠缠态,如 $|000\rangle + |111\rangle$ 和 $|+++ \rangle + |--- \rangle$ 。图13是根据本文描述的一些实施方式的用于制备 $|000\rangle + |111\rangle$ GHZ簇态的说明性量子电路1300的示意图。量子电路

1300开始于通过对每个逻辑量子比特应用位移302($D_1(\alpha)$ 、 $D_2(\alpha)$ 、 $D_3(\alpha)$),在三个逻辑量子比特中制备三个任意态。此后,对每个逻辑量子比特执行奇偶性测量304。对第一量子比特和第二量子比特执行第一对ZZ测量802,并且随后对第二量子比特和第三量子比特执行第二对ZZ测量802。最后,对每个逻辑量子比特执行奇偶性测量304。如前所述,为了提供容错,第一奇偶性测量和最后的奇偶性测量必须一致,第一对ZZ测量802必须一致,并且第二对ZZ测量802必须一致,以制备 $|000\rangle+|111\rangle$ GHZ簇态。

[0174] 图14是根据本文描述的一些实施方式的用于制备 $|+++ \rangle+|--- \rangle$ GHZ簇态的另一说明性量子电路1400的示意图。量子电路1400类似于图13的量子电路1300,但在两组奇偶性测量304之间执行的不是两对ZZ测量802,而是一对ZZZ测量902。在这种情况下,每个ZZZ测量902必须一致,以保持容错。

[0175] 将GHZ状态制备与贝尔态测量结合使得能够在逻辑量子比特之间执行容错CNOT门。与大多数隐形传送门协议一样,这可以分为两个步骤:创建合适的纠缠态,然后在该纠缠态与逻辑量子比特之间进行贝尔测量,以同时将信息隐形传送至剩余的未测量的量子比特并且执行门。可以执行该门,直到一些泡利纠正(取决于测量结果)。

[0176] 为了制备CNOT门,首先可以制备 $|\chi\rangle$ 态,如图15的量子电路1500的示例中所描绘。 $|\chi\rangle$ 态可以描述为 $\text{CNOT}_{23}(|\Psi_{12}\rangle \otimes |\Psi_{34}\rangle)$,其中 $|\Psi\rangle$ 是贝尔态 $(|00\rangle+|11\rangle)/\sqrt{2}$ 。为了制备 $|\chi\rangle$ 态,两种不同类型的GHZ态与容错贝尔测量1200融合在一起。在量子比特3与4之间进行的贝尔测量将其余量子比特投影到 $|\chi\rangle$ 态中,直到由贝尔测量结果确定的局部泡利操作。这等同于由两个较小的构建块构建较大的簇态。

[0177] 根据一些实施方式,一旦制备了 $|\chi\rangle$ 态,它就可以被用于隐形传送CNOT门,如图16的量子电路1600所示。可以使用成对的逻辑量子比特1和2和逻辑量子比特5和6之间的贝尔测量1200来隐形传送CNOT门。量子电路1600的输出作为逻辑信息存储在未测量的量子比特3和4上,并且贝尔测量结果指示哪些(如果有)泡利纠正应当应用于输出CNOT $|\psi_2\psi_1\rangle$ 。应当认识到,可能存在更有效的方式来编译具有CNOT门的量子电路,从而减少操作和测量的数量,但这种明确的构造对于证明本文描述的操作集确实是通用的非常有用。

[0178] 将状态制备与贝尔态测量结合还使得能够在两个逻辑量子比特之间执行容错哈达玛门。图17A是根据一些实施方式的用于制备哈达玛态 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 的量子电路1700的示意图。图17B中描绘了该量子电路1700的扩展版本。

[0179] 前体双量子比特纠缠态是XZ算符的本征态,表示为 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 。这种状态也可以写成 $|0+\rangle\pm|1-\rangle$ 、 $|+i+i\rangle\pm i|-i-i\rangle$ 或 $H_2|\psi_{12}\rangle$ 。量子电路1700利用最初处于 $|\text{vac}\rangle$ 态的三个逻辑量子比特。每个量子比特以位移302位移进入相干态,并且 $\pi/2$ 的旋转1706将三个逻辑量子比特置于 $|+i\rangle$ 态。在一些实施方式中,可以使用容错SNAP门或可切换Kerr门来执行旋转1706。首先使用容错奇偶性测量304和ZZZ测量902对三个逻辑量子比特执行ZZZ测量902,产生状态 $|+i+i+i\rangle\pm|-i-i-i\rangle$ 。测量集的不一致指示发生了一阶错误,并且应当重新启动协议。

[0180] 此后,使用测量600在X基中对量子比特中之一进行破坏性测量,该测量600利用在与三个逻辑量子比特不同的逻辑基中初始化的附加辅助量子比特。测量600包括在逻辑量子比特中之一与辅助量子比特之间进行分束器相互作用1708,并且然后使用测量606破坏性地测量逻辑量子比特和辅助量子比特的状态。在X基中对该逻辑量子比特进行破坏性测

量将另外两个逻辑量子比特的双量子比特状态投影到状态 $|+i+i\rangle \pm i|-i-i\rangle$ 上,其中符号由ZZZ测量902和X测量600的结果二者确定。

[0181] 在制备 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 态之后,它可以被用于将单量子比特哈达玛门隐形传送到另一逻辑量子比特上,如图18的量子电路1800中描绘的。在一些实施方式中,量子电路1800包括在具有 $|\psi_L\rangle$ 态的逻辑量子比特与双量子比特 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 态的量子比特之间执行容错贝尔测量1200。通过执行容错贝尔测量1200,单量子比特哈达玛门可以被隐形传送到双量子比特 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 态的剩余逻辑量子比特上。在执行容错贝尔测量1200之后,双量子比特 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle$ 态的第二量子比特现在可以存储量子态 $HX^{m_{zz}}Z^{m_{xx}}|\psi_L\rangle$ 。

[0182] 结合图17A至图18所述的协议利用最少五个逻辑量子比特(例如五个微波腔谐振器),其中辅助量子比特耦合至每个逻辑量子比特。应当认识到,哈达玛门的这种实现并不特别地硬件高效,但结合CNOT和 $R_z\theta$ 操作,可以看出上述量子操作集是通用的。

[0183] IV. 使用SWAP测试进行状态纯化

[0184] 经由SWAP测试进行纯化是指用于使一般量子比特对称化的通用方法。发明人已经认识并领会到,这种方法可以用于高保真地制备玻色子量子比特中的状态。特别地,在使用容易出错(例如有噪声)的程序生成目标态的若干副本时,可以使用成对状态之间的非破坏性SWAP测试来减少错误。然后可以对SWAP测试结果进行后选择,以减少状态生成中的错误。

[0185] 这是可以用于玻色子模式下的一般状态制备以减少状态制备中随机错误的影响的独立程序。在本文描述的基于测量的方案中制备 $|\pm i\rangle$ 和 $|T\rangle$ 态,作为使用容错SNAP门作为非Clifford操作的替选方案可能特别有用。不是实现直接容错门(例如SNAP门),而是可以使用容错测量来纯化由其他手段(例如最优控制脉冲或从辅助量子比特到逻辑量子比特的状态传送)产生的噪声状态。这种方法的优点是,噪声通道可能很复杂,并且每个输入腔状态都不同。

[0186] SWAP测试测量可以对一阶错误进行容错,并且因此初始态制备错误可以比SWAP测试错误大得多。在这种条件下,SWAP测试可以被用于纯化初始态,并且减少状态制备错误。该过程开始于制备要初始化的期望量子态的N个副本噪声。为简单起见,可以假设在状态制备中出现一些错误的概率为 p_{err} ,而不出现错误的概率为 $(1-p_{\text{err}})$ 。当在这些腔中的两个之间执行SWAP测试测量时,测量结果指示失败的概率 $p_{\text{err}}/2$ 很小,因此必须重新启动协议。但大多数情况下,SWAP测试测量都会成功,产生两个逻辑量子比特,错误概率为 $p_{\text{err}}/2$ 。这种成功概率与状态保真度的直接权衡非常有利。

[0187] 通过对所有不同配对的腔重复进行SWAP测试,当SWAP测试测量成功时,错误概率可以降低,直到达到由SWAP测试测量的保真度所设置的极限。由于SWAP测试可以容错地执行,因此原则上这种技术可以用于以高保真度制备腔状态。

[0188] 为了示出这种方法,描述从通用操作的单个容错SWAP测试测量的构造。图19是根据一些实施方式的说明性量子电路1900的示意图,该量子电路1900用于在第一量子比特与第二量子比特之间容错地实现SWAP测试。该上下文中的SWAP测试是对两个逻辑量子比特之间的SWAP算符的非破坏性测量。如果 $|\psi_1\rangle$ 和 $|\psi_2\rangle$ 是初始输入状态,则SWAP测试将把这些状态投影到 $(|\psi_1\psi_2\rangle \pm |\psi_2\psi_1\rangle)/\sqrt{2}$ 中,因为对称和非对称叠加是SWAP算符的 ± 1 本征态。

[0189] 要执行这种测量,首先在两个逻辑量子比特之间进行50-50分束器相互作用

1900a。之后,在“分束器”框架内使用奇偶性测量304测量模式中之一的光子数奇偶性。通常,对单个逻辑量子比特的奇偶性测量会测量奇偶性算符 $e^{i\pi a_1^\dagger a_1}$,但在分束器框架中,会进行 $a_1 \rightarrow (a_1 + a_2)/\sqrt{2}$ 变换,使得奇偶性测量304会测量SWAP算符 $e^{i\frac{\pi}{2}(a_1^\dagger + a_2^\dagger)(a_1 + a_2)}$ 。在执行奇偶性测量304之后,进行另一50-50分束器相互作用1900b。最后的分束器1900b是通过使分束器泵中之一的相位反相来实现的反向50-50分束器。这操作的序列等同于分束器框架中的奇偶性测量。

[0190] 以面值计量,SWAP测试的结果解释起来非常简单。如果获得的结果是+1(即辅助量子比特处于 $|g\rangle$ 态),则两个输入状态更有可能是相同的 $|\psi_1\rangle$ 和 $|\psi_2\rangle$,并且因此是无错误的。通过对这一结果进行后选择,任何状态具有错误的概率都相应降低。

[0191] 获得结果为 ± 1 的概率是 $1 \pm |\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle|^2/2$ 。如果状态中之一在初始制备中经受错误,那么在各种可能的错误中,有可能 $|\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle| = 0$ 。此外,获得结果为+1并不保证错误没有发生。如果 $|\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle| = 0$,则仍有可能以0.5的概率获得+1的结果。因此,当SWAP测试通过时,两个腔状态的错误会减半,但永远不会完全消除。

[0192] 密度矩阵形式可以更精确地表达这一点。初始噪声腔态可以写为:

[0193] $\rho_{init} = (1 - p_{err}) |\psi_t\rangle\langle\psi_t| + p_{err} \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ 其中, $|\psi_t\rangle$ 是要以高保真度制备的目标态,以及 $|\psi_i\rangle$ 是在初始制备中出现错误时获得的状态,其中 $\langle\psi_i | \psi_t\rangle = 0$,以及 p_i 是和为1的实数标量。

[0194] 初始双腔状态可以写为 $\rho_{init}^{(1)} \otimes \rho_{init}^{(2)}$ 。获得+1结果等同于应用投影算符 $(1 + \text{SWAP})/2$ 。如果部分迹在 p_{err} 中取一阶,则每个逻辑量子比特的状态都将是 ρ_{final} ,其中:

[0195] $\rho_{final} = (1 - p_{err}/2) |\psi_t\rangle\langle\psi_t| + p_{err}/2 \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

[0196] 图20是根据本文所述技术的一些实施方式的说明性量子电路2000的示意图,该量子电路2000被配置成减少在四个量子比特中制备的量子态中存在的错误。量子电路2000包括若干SWAP测试1900和成对腔之间的SWAP操作2002。在图20的示例中,该过程开始于 ρ_{init} 的四个副本。在量子电路2000的实现期间,可以在成对的逻辑量子比特的所有六种排列之间执行SWAP测试1900,以将每个状态的错误减小到 $p_{err}/8$ 。利用 ρ_{init} 的附加副本,可以进一步降低错误率,代价是添加更多的SWAP测试和SWAP操作。如结合本文中图8A至图8D所述,该协议可以通过与ZZ测量相同的硬件实验地实现。

[0197] V. 针对克尔效应和 χ' 进行纠正

[0198] 在一些量子信息处理方案中,期望考虑到可能向量子系统引入扰动的附加效应。例如,克尔效应和 χ' 效应可能会导致扰动本文所述的ZZ和/或ZZZ测量的影响,使得它们不那么鲁棒。这些效应对于利用大量光子(例如大于或等于10个光子)的系统尤为明显,因为所测量的辅助量子比特的状态之间的转换的频率取决于存储在逻辑量子比特中的光子的数目。例如, χ' 效应与存储在逻辑量子比特中的光子的数目成二次方比例,使得光子数越多, χ' 效应就越难以区分和纠正。在MBQC中,这些效应的考虑尤为重要,其中更大数目的光子被用于执行计算过程。

[0199] 克尔效应和 χ' 的影响可以用以下双量子比特哈密顿的最后两个项来描述:

$$[0200] \quad \frac{H}{\hbar} = g_{bs}(\hat{a}^\dagger \hat{b} + \hat{a} \hat{b}^\dagger) + \chi \hat{a}^\dagger \hat{a} |f\rangle \langle f| + \chi \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger \hat{a} \hat{a} |f\rangle \langle f| + \frac{\kappa}{2} \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger \hat{a} \hat{a}$$

[0201] 图21是根据一些实施方式的布洛赫球的示意图,示出了克尔效应和 χ' 对量子态的影响。这两种效应导致布洛赫球周围的扰动2102和2104,这可能会降低本文所述的ZZ和/或ZZZ测量的鲁棒性,并且增加量子电路中的退相干的概率。

[0202] 为了抵消这些影响,可以使用替选过程制备存储在逻辑量子比特中的量子态,并且类似地改变量子操作。在一些实施方式中,可以通过首先将逻辑量子比特的状态从真空态 $|\text{vac}\rangle$ 位移到状态 $|\alpha\rangle$ 来制备猫状态。此后, $|\alpha\rangle$ 状态可以使用包括选择性g-f π 脉冲梳的驱动波形被驱动到 $|0\rangle_L$ 态。选择性g-f π 脉冲梳可以是包括与频率($0\chi, 4\chi, 8\chi, 12\chi, \dots$)对应的多个频率的 π 脉冲。在g-f π 脉冲梳中使用这些选择性频率可以解决 χ' 的影响,同时改变分量 π 脉冲的相位可以解决克尔效应的扰动,因为这些相位对逻辑量子比特的能级的等间距提供了二次纠正。图22A中示出了选择性g-f π 脉冲梳的示例,图22B中示出了对应的傅立叶频谱。

[0203] 在一些实施方式中,还可以对测量进行调整,以抵消 χ' 和克尔效应的影响。例如,可以同时提取XX和ZZ信息,以便使用三级辅助量子比特(如三级超导传输子量子比特)执行贝尔测量。可以执行三次测量来提取该信息。在一些实施方式中,这些测量可以同时执行。首先,可以使用选择性拉曼(Raman)转换来测量与 $|f\rangle$ 态相关联的信息。其次,与 $|e\rangle$ 态相关联的信息可以通过用包括 π 脉冲的驱动波形驱动辅助量子比特来测量,该 π 脉冲包括频率为($3\chi, 4\chi, 7\chi, 8\chi, \dots$)的选择性频率梳。第三,与 $|g\rangle$ 态相关联的信息可以通过用包括 π 脉冲的驱动波形来测量,该 π 脉冲包括频率为($1\chi, 2\chi, 5\chi, 6\chi, \dots$)的选择性频率梳。图23A中示出了这样的包括两个频率梳的驱动波形的示例,以证明 $|e\rangle$ 态和 $|g\rangle$ 态。图23B中示出了对应的傅立叶变换。

[0204] 图24是描述根据本文所述技术的一些实施方式的用于执行量子操作的另一过程2400的流程图。过程2400可以用于操作例如包括电路量子电动力学部件的量子信息处理系统。量子信息处理系统可以包括耦合至第一逻辑量子比特(如微波腔谐振器)的辅助量子比特(如超导传输子量子比特、SNAIL量子比特、振荡器或其他量子比特)。

[0205] 在一些实施方式中,过程2400可以开始于动作2410,其中,生成第一驱动波形并且向辅助量子比特施加第一驱动波形。结合过程2400所述的驱动波形可以被存储在一个或多个计算机可读存储介质上(例如,本地地或远程地),并且可以由控制器访问。为了施加驱动波形,控制器可以使能量源(例如微波源)产生驱动波形,并且将驱动波形传输至辅助量子比特和/或量子信息处理系统的其他部件。

[0206] 在一些实施方式中,第一驱动波形包括 π 脉冲的第一梳,该 π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第一选择对应的选择性频率。例如, π 脉冲的第一梳可以具有与($3\chi, 4\chi, 7\chi, 8\chi, \dots$)频率对应的选择性频率。

[0207] 在一些实施方式中,方法可选地包括:在读出辅助量子比特的状态之前,执行操作2420。动作2420可以包括:生成第二驱动波形并且向辅助量子比特施加第二驱动波形。第二驱动波形可以包括 π 脉冲的第二梳,该 π 脉冲具有与第一逻辑量子比特的偶数和奇数腔谐振频率的第二选择对应的选择性频率。在一些实施方式中, π 脉冲的第二梳可以具有与($1\chi, 2\chi, 5\chi, 6\chi, \dots$)的选择性频率对应的选择性频率。

[0208] 在一些实施方式中,在动作2410或2420之后,过程2400可以进行到动作2440,其中,可以读出辅助量子比特的状态。在一些实施方式中,可以使用耦合至辅助量子比特的读出腔或微波条带谐振器读出辅助量子比特的状态。为了读出辅助量子比特的状态,可以对辅助量子比特的状态进行测量。例如,可以对辅助量子比特的状态进行破坏性测量。在一些实施方式中,例如,可以使用能够在读出腔或微波条带谐振器的可能状态之间进行区分的微波辐射检测器进行这种测量。例如,在一些实施方式中,微波辐射检测器可以是零差检测器或外差检测器。

[0209] 在一些实施方式中,执行量子操作包括:测量第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间的贝尔态。在这样的实施方式中,量子电动力学系统还包括通过第一分束器耦合至第一逻辑量子比特的第二逻辑量子比特。例如,第一逻辑量子比特和第二逻辑量子比特可以分别是由第一分束器耦合的微波腔谐振器。该方法可以包括:在读出辅助量子比特的状态之前,向第一分束器施加第三驱动波形,以在第一逻辑量子比特与第二逻辑量子比特之间进行失谐分束器相互作用。此后,过程2400可以进行到上述操作2440。

[0210] 在一些实施方式中,过程2400附加地包括:生成第一四量子比特簇态。四量子比特簇态可以至少部分地通过向耦合第一逻辑量子比特和第三逻辑量子比特的第二分束器施加第四驱动波形来生成,以在第一逻辑量子比特与第三逻辑量子比特之间进行分束器相互作用。此外,可以通过向将第二逻辑量子比特耦合至第四逻辑量子比特的第三分束器施加第五驱动波形来生成四量子比特簇态。通过这种方式,存储在四个逻辑量子比特中的量子态可以纠缠以创建四量子比特簇态。

[0211] 在一些实施方式中,过程2400附加地包括:生成多量子比特簇态。例如,多量子比特簇态可以是本文所述的XZZX簇态,或者可以是适合MBQC的任何其他多量子比特簇态。可以至少部分地通过向耦合第一四量子比特簇态的第一逻辑量子比特和第二四量子比特簇态的第一逻辑量子比特的第四分束器施加第六驱动波形来生成多量子比特簇态。

[0212] VI. 簇态制备

[0213] 发明人已经认识并领会到,上述量子操作可以用于生成适合MBQC的簇态。一旦生成了簇态,就可以通过测量某些基中的量子比特来执行计算。替选地或者附加地,簇态对于用于量子通信和网络是有用的。

[0214] 图25A是根据一些实施方式的说明性量子电路2500的示意图,该量子电路2500被配置成在两个量子比特中制备贝尔态。图25B是双量子比特ZZ贝尔态2510的示意图,在一些实施方式中,可以使用量子电路2500制备双量子比特ZZ贝尔态2510。图25B的图示包括以封闭圆圈表示的在第一逻辑基中制备的两个量子比特2512。连接两个量子比特2512的线表示通过纠缠耦合。

[0215] 2500的量子电路开始于分别在 $|\alpha\rangle$ 态和 $i|\alpha\rangle$ 态中制备的两个逻辑量子比特。两个逻辑量子比特由分束器耦合,并且量子电路2500包括在两个逻辑量子比特之间创建分束器相互作用2504。在分束器相互作用2504之前和之后,使用奇偶性测量304来确保容错。如果 $\Pi_1 + \Pi_2 = \Pi_3 + \Pi_4$,则贝尔态 $|\Phi_{\text{Bell}}\rangle$ 的创建是成功的。

[0216] 如图26A所示,四量子比特簇态的一个示例可以通过链式分束器相互作用来创建。图26B是可以使用量子电路2600生成的四量子比特簇态2610的示意图。图26A的量子电路2600首先开始于在 $|\sqrt{2}\alpha\rangle$ 和 $i|\sqrt{2}\alpha\rangle$ 状态中制备的两个逻辑量子比特。对这两个逻辑量子

比特中的每一个执行第一奇偶性测量304,并且然后在两个逻辑量子比特之间进行分束器相互作用2604a。此后,通过分束器相互作用2604b和2604c,将两个初始逻辑量子比特中的每一个耦合至在 $|0\rangle$ 态下制备的两个附加的逻辑量子比特。此后,对所有四个逻辑量子比特进行第二奇偶性测量304。如果 $\Pi_1+\Pi_2=\Pi_3+\Pi_4+\Pi_5+\Pi_6$,则四量子比特簇态的生成是成功的。

[0217] MBQC的簇态的另一构建块是由两个量子比特组成的双量子比特簇,每个量子比特都是在不同的逻辑基中通过隐形传送哈达玛态制备的。图27A是根据一些实施方式的量子电路2700的示意图,该量子电路2700被配置成生成图27B所描绘的双量子比特纠缠态2710。双量子比特纠缠态2710包括在第一逻辑基(例如X)中制备的第一量子比特2512和在第二不同逻辑基(例如Z)中制备的第二量子比特2714。

[0218] 在一些实施方式中,量子电路2700使用在 $|+i\sqrt{2}\alpha\rangle_L$ 态和 $|0\rangle$ 态中制备的两个逻辑量子比特,并且首先在它们之间进行分束器相互作用2702。此后,对每个逻辑量子比特执行奇偶性测量304,产生 $|++\rangle+i|--\rangle$ 。然后对每个逻辑量子比特各应用一次容错SNAP操作2704,产生 $|\Phi_{\text{Had}}\rangle=|+i+i\rangle+i|-i-i\rangle\equiv|0+\rangle+|1-\rangle$ 态。

[0219] 图28A是描述根据本文所述技术的一些实施方式的融合过程的示意图,该融合过程可以用于生成另一四量子比特簇态。过程可以开始于阶段2800处,四个单独的簇态包括三个二量子比特状态和一个四量子比特状态。贝尔测量2802(其可以是本文所述的任何合适的贝尔测量)可以用于“融合”这些较小资源态中的每一个的量子比特,以产生四量子比特簇态2810。

[0220] 量子操作(如结合图25A至图28B所述的量子操作)可以进一步被链接,以生成对MBQC有用的较大的簇态。例如,这样的簇态可以包括本文所述的XZZX簇态,或者,替代地或者附加地包括RHG簇态。图28B是描述根据本文所述技术的一些实施方式的形成XZZX簇态的示意图。

[0221] 如图28B的示例中所示,四量子比特簇态2610和2810可以被融合以形成较大的簇态,例如簇态2820。这些较大的簇态可以进一步被融合,以创建用于MBQC或其他应用的最终簇态。如图28B中所描绘的,在一些实施方式中,较大的簇态可以是XZZX簇态2830。XZZX簇态的另外的方面描述在J.Claes、J.Eli Bourassa和S.Puri的“Tailored cluster states with high threshold under biased noise”中,该文献于2022年1月25日提交至ArXiv并位于arXiv:2201.10566,其全部内容通过引用并入本文。

[0222] 在图29中示出了可以结合本文提供的公开内容的任何实施方式来使用的经典计算机系统2900的说明性实现方式。在一些实施方式中,可以在计算机系统2900上和/或使用计算机系统2900实现本文所述的过程中的任何一个。计算机系统2900可以包括一个或多个处理器2910和一个或多个制品,一个或多个制品包括非暂态计算机可读存储介质(例如,存储器2920和一个或多个非易失性存储介质2930)。处理器2910可以以任何合适的方式控制向存储器2920和非易失性存储装置2930写入数据以及从存储器2920和非易失性存储装置2930读取数据。为了执行本文所述的任何功能,处理器2910可以执行存储在在一个或多个非暂态计算机可读存储介质(例如,存储器2920)中的一个或多个处理器可执行指令,所述非暂态计算机可读存储介质可以用作存储由处理器2910执行的处理器可执行

指令的非暂态计算机可读存储介质。

[0223] 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,应当认识到,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想到用于执行功能以及/或者获得本文描述的结果和/或一个或多个优点的各种其他手段和/或结构,并且这样的变体和/或修改中的每一个被认为在本文描述的実施方式的范围内。本领域技术人员将认识到或能够使用不超过常规的实验确定本文描述的特定实施方式的许多等同方案。因此,要理解的是,前述实施方式仅作为示例呈现,并且在所附权利要求及其等同物的范围内,发明实施方式可以以不同于具体描述的方式被实践。此外,如果特征、系统、物品、材料、装备和/或方法不相互矛盾,则这些特征、系统、物品、材料、装备和/或方法中的两个或更多的任何组合都被包括在本公开内容的范围内。

[0224] 可以以多种方式中的任何一种来实现上述实施方式。涉及处理或方法的执行的本公开内容的一个或多个方面和实施方式可以利用可由装置(例如,计算机、处理器或其他装置)执行的程序指令来执行或者控制处理或方法的执行。在这方面,可以将各种发明构思实现为编码有一个或多个程序的计算机可读存储媒介(或者各种计算机可读存储介质)(例如,计算机存储器、一个或更多软盘、压缩盘、光盘、磁带、闪速存储器、现场可编程门阵列或其他半导体器件中的电路配置、或者其他有形计算机存储介质),当在一个或多个计算机或其他处理器上执行时,该一个或多个程序执行实现上述各种实施方式中的一个或多个实施方式的方法。计算机可读媒介或介质可以是可移动的,使得存储在其上的一个或多个程序可以被加载到一个或多个不同的计算机或其他处理器上,以实现上述各个方面。在一些实施方式中,计算机可读介质可以是有形的(例如,非暂态的)计算机可读介质。在一些实施方式中,计算机可读介质可以包括持久存储器。

[0225] 本文中在一般意义上使用术语“程序”或“软件”来指代可以用于对计算机或其他处理器进行编程以实现上述各个方面的任何类型的计算机代码或计算机可执行指令集。另外,应当认识到,根据一个方面,在执行时执行本公开内容的方法的一个或多个计算机程序不需要驻留在单个计算机或处理器上,而是可以以模块化方式分布在多个不同的计算机或处理器之间以实现本公开内容的各个方面

[0226] 计算机可执行指令可以呈许多形式,比如由一个或多个计算机或者其他装置执行的程序模块。通常,程序模块包括执行具体任务或者实现具体抽象数据类型的例程、程序、对象、部件、数据结构等。通常,程序模块的功能可以根据需要在各种实施方式中被组合或分布。

[0227] 当以软件实现时,软件代码可以在任何合适的处理器或处理器集合上执行,而不管是设置在单个计算机中还是分布在多个计算机中。

[0228] 此外,应当认识到,作为非限制性示例,计算机可以被实施为例如机架式计算机、台式计算机、膝上型计算机或平板计算机的多种形式中的任何一种。另外,计算机可以被嵌入在通常不被认为是计算机但具有合适的处理能力的装置中,所述装置包括个人数字助理(PDA)、智能电话或任何其他合适的便携式或固定的电子装置。

[0229] 此外,计算机可以具有一个或多个输入装置和输出装置。这些装置可以用于呈现用户界面等。可以用于提供用户界面的输出装置的示例包括用于输出的视觉呈现的打印

机或显示屏以及用于输出的听觉呈现的扬声器或其他声音生成装置。可以用于用户界面的输入装置的示例包括键盘以及诸如鼠标、触摸板和数字化平板的指向装置。作为另一示例，计算机可以通过语音识别或其他可听格式接收输入信息。

[0230] 这样的计算机可以通过一个或更多个网络以任何合适的形式互连，包括局域网或广域网，所述一个或更多个网络例如企业网以及智能网 (IN) 或因特网。这样的网络可以基于任何合适的技术，并且可以根据任何合适的协议工作，并且可以包括无线网络、有线网络或光纤网络。

[0231] 此外，如所描述的，一些方面可以被实施为一种或更多种方法。作为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，可以构造以与所示出的顺序不同的顺序来执行动作的实施方式，即使在说明性实施方式中被示出为顺序的动作，实施方式也可以包括同时执行一些动作。

[0232] 如本文中限定和使用的定义应当被理解为控制在字典定义、通过引用并入的文献中的定义和/或所限定的术语的普通含义上。

[0233] 除非明确相反地指出，否则本说明书和权利要求中使用的不定冠词“一个”和“一种”应当被理解为表示“至少一个”。

[0234] 本说明书和权利要求中使用的短语“和/或”应当被理解为表示如此结合的元素——即在某些情况下结合地存在而在其他情况下分离地存在的元素——中的“一个或两个”。用“和/或”列出的多个元素应当以相同的方式解释，即，如此结合的“一个或更多个”元素。除了由“和/或”子句具体标识的元素之外，可以可选地存在其他元素，而无论这些元素与具体标识的元素相关还是不相关。因此，作为非限制性示例，对“A和/或B”的引用在结合诸如“包括”的开放式语言使用时在一个实施方式中可以仅指A (可选地包括除B之外的元素)；在另一实施方式中，仅指B (可选地包括除A之外的元素)；在又一实施方式中，指A和B (可选地包括其他元素)；等。

[0235] 如本文在说明书中和权利要求中使用的，关于一个或更多个元素的列表的短语“至少一个”应当被理解为意指选自元素列表中的元素中的任何一个或更多个元素的至少一个元素，但不一定包括元素列表内具体列出的每个和每一元素中的至少一个元素，并且不排除元素列表中的元素的任何组合。该定义还允许除了在短语“至少一个”所指的元素列表内具体标识的元素之外的元素可以可选地存在，无论与具体标识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” (或等同地，“A或B中的至少一个”，或等同地“A和/或B中的至少一个”) 可以指代在一个实施方式中为至少一个A，可选地包括多于一个的A，不存在B (并且可选地包括除B以外的元素)；在另一实施方式中，至少一个B，可选地包括多于一个的B，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，至少一个A，可选地包括多于一个的A，以及至少一个B，可选地包括多于一个的B (以及可选地包括其他元素)；等。

[0236] 在权利要求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”等应当理解为开放式的，即是指包括但不限于。只有过渡短语“由……组成”和“基本上由……组成”应分别是封闭式或半封闭式的过渡短语。

[0237] 术语“近似”和“大约”可以用于在一些实施方式中意指在目标值的 $\pm 20\%$ 内、在一些实施方式中意指在目标值的 $\pm 10\%$ 内、在一些实施方式中意指在目标值的 $\pm 5\%$ 内、以及

在一些实施方式中意指在目标值的 $\pm 2\%$ 内。术语“近似”和“大约”可以包括目标值。

100

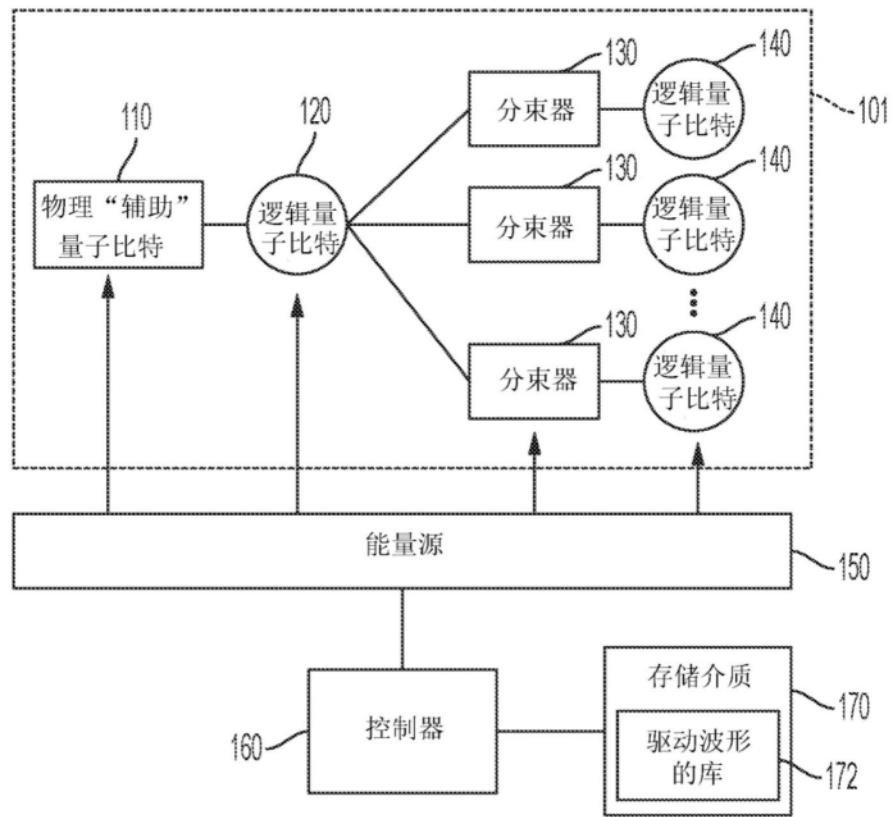


图1

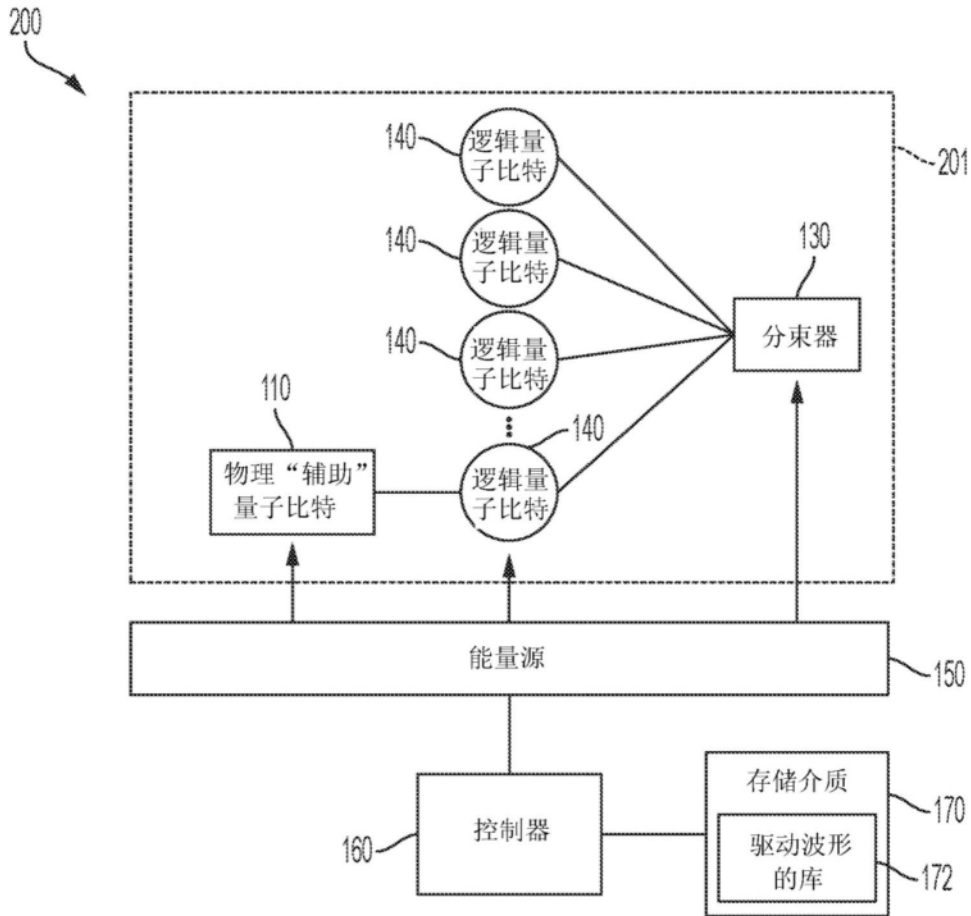


图2

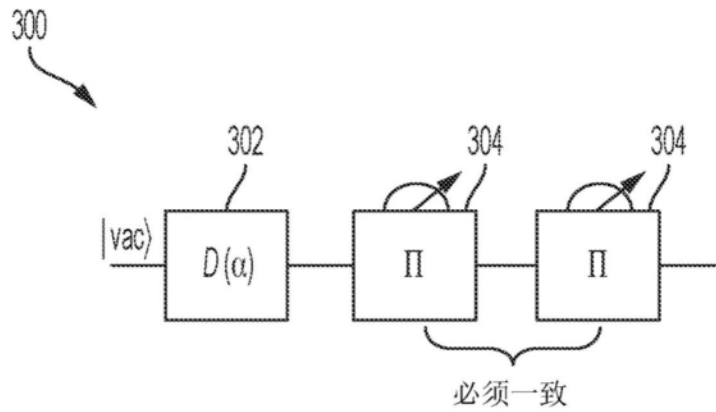


图3A

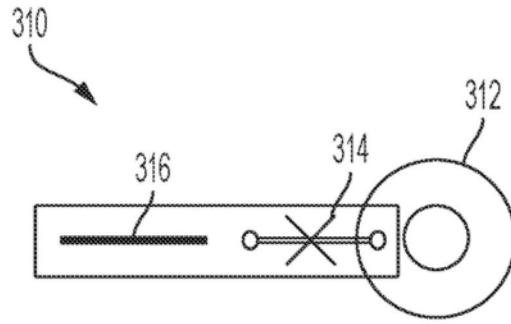


图3B

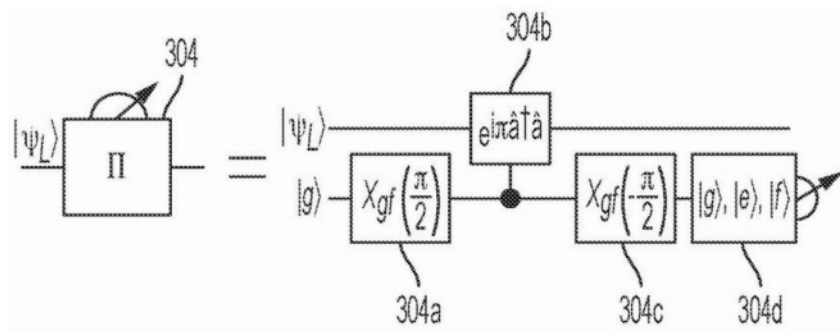


图3C

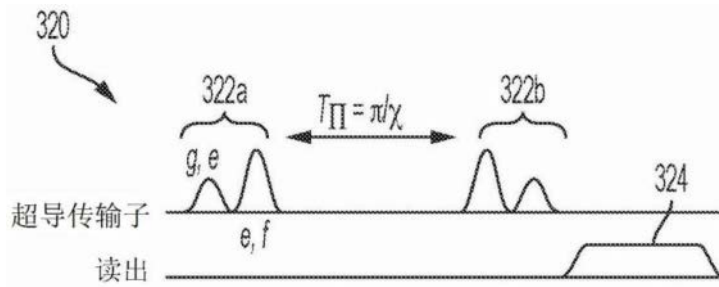


图3D

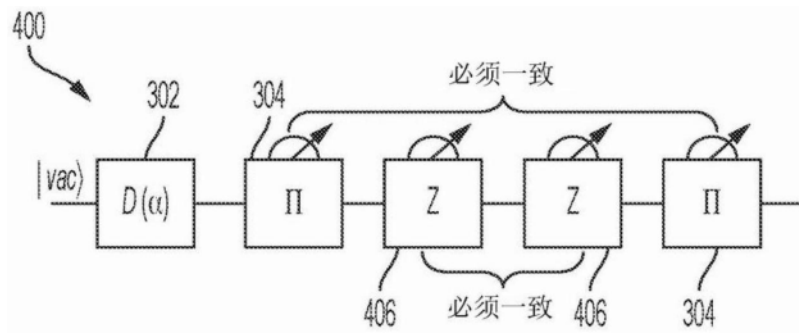


图4A

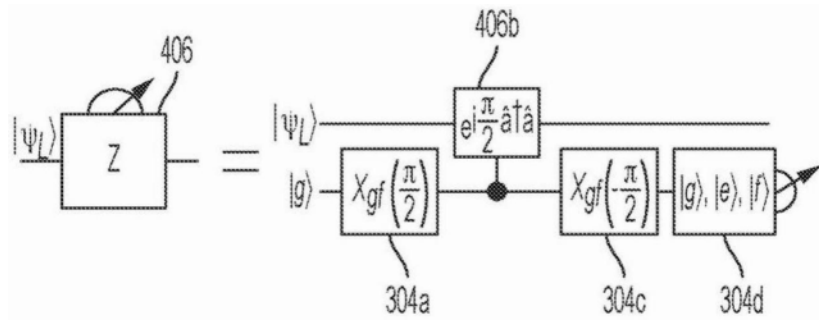


图4B

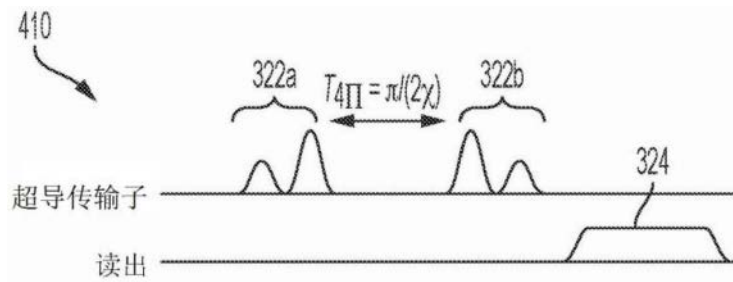


图4C

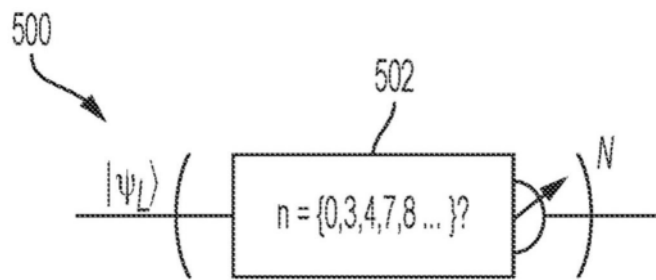


图5

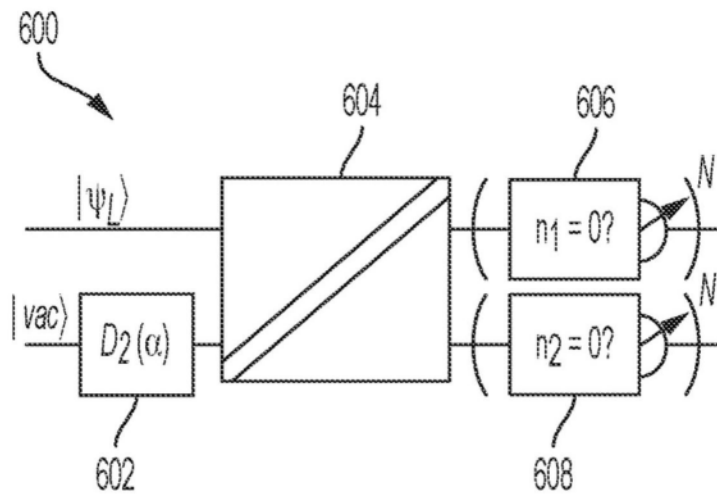


图6

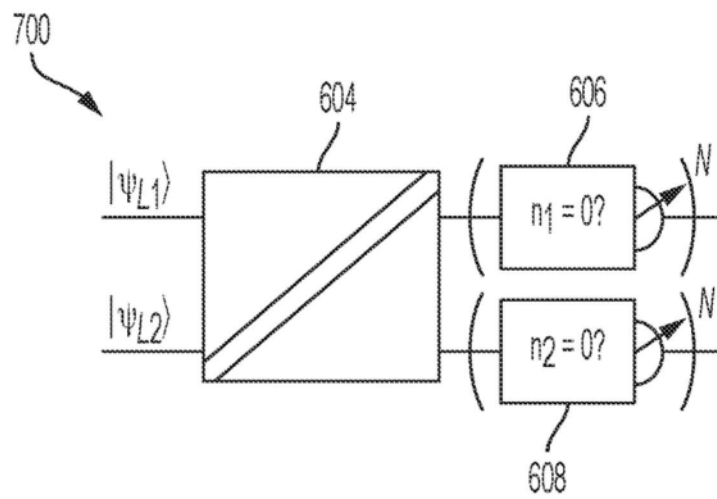


图7

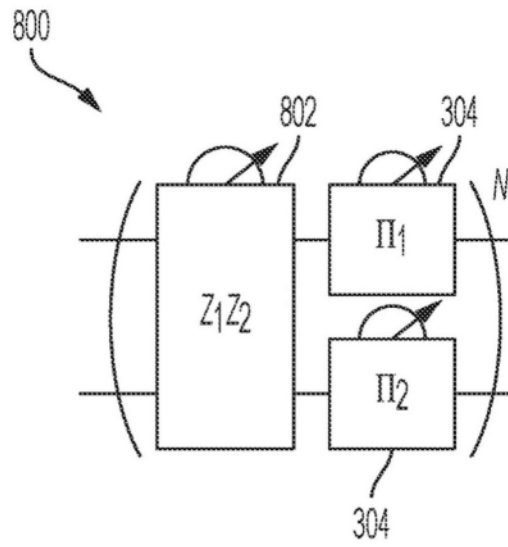


图8A

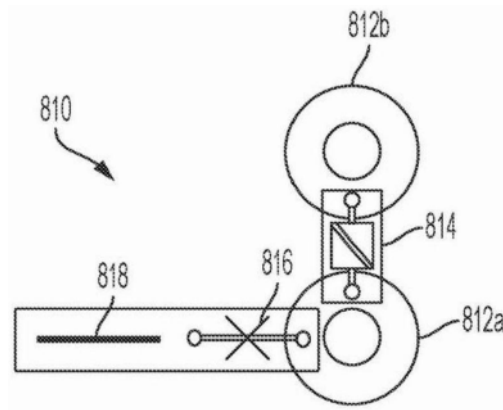


图8B

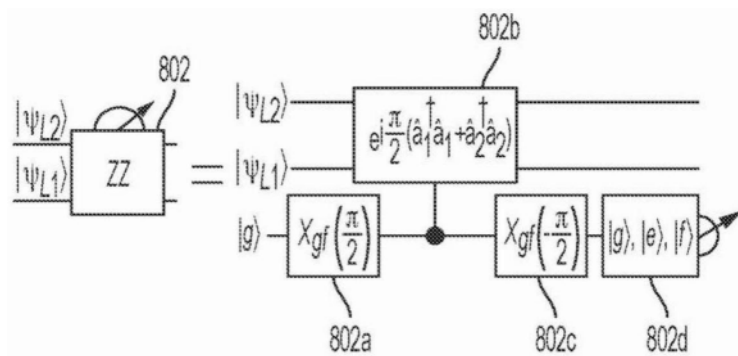


图8C

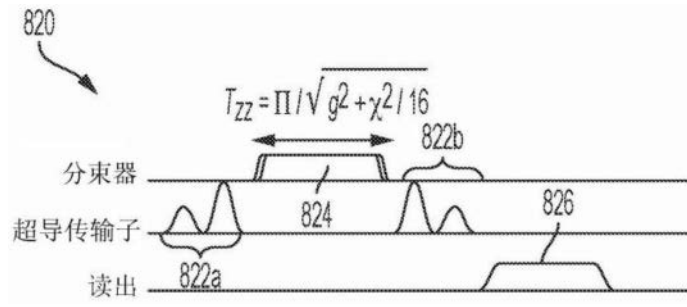


图8D

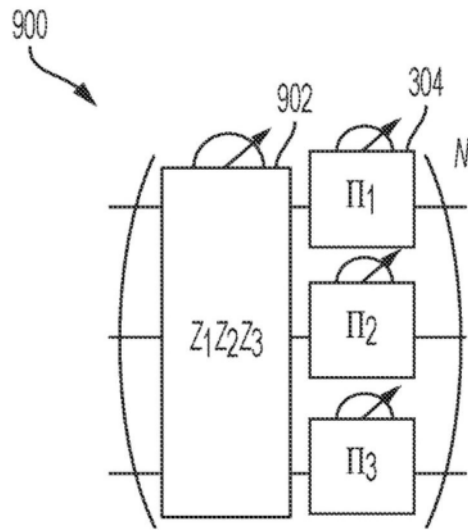


图9A

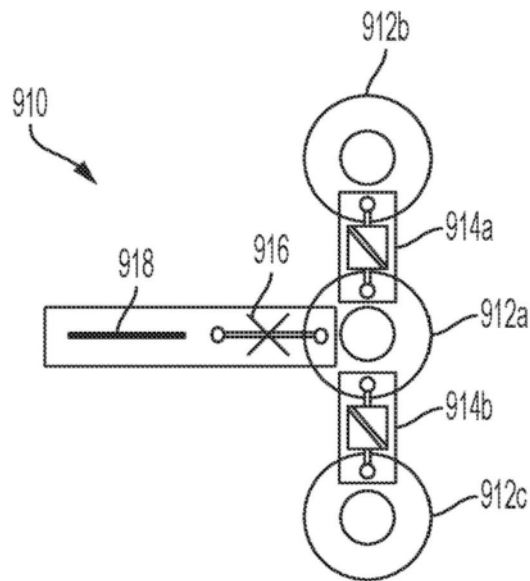


图9B

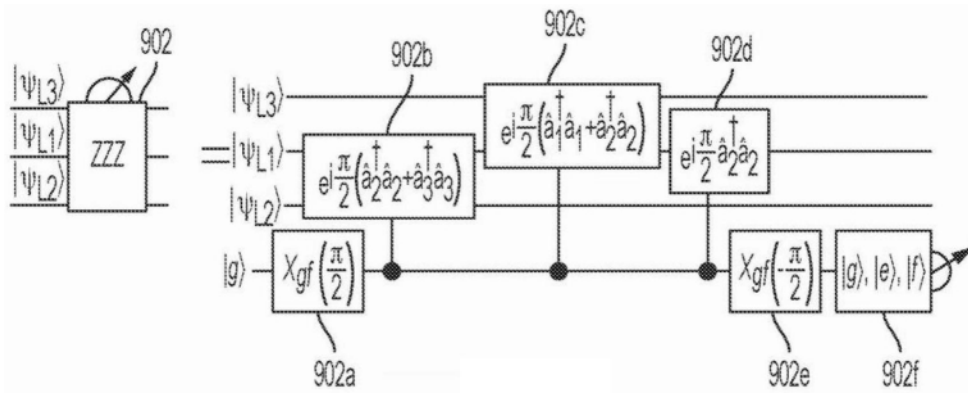


图9C

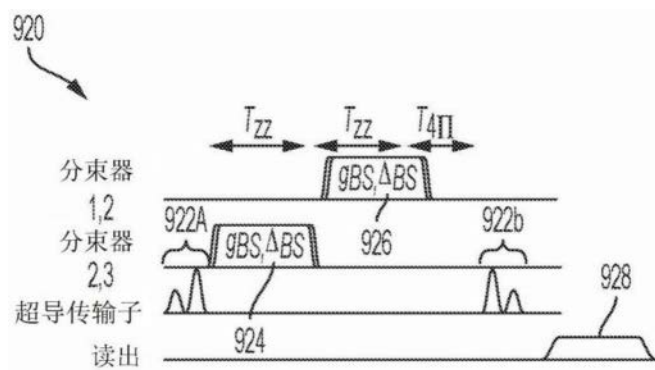


图9D

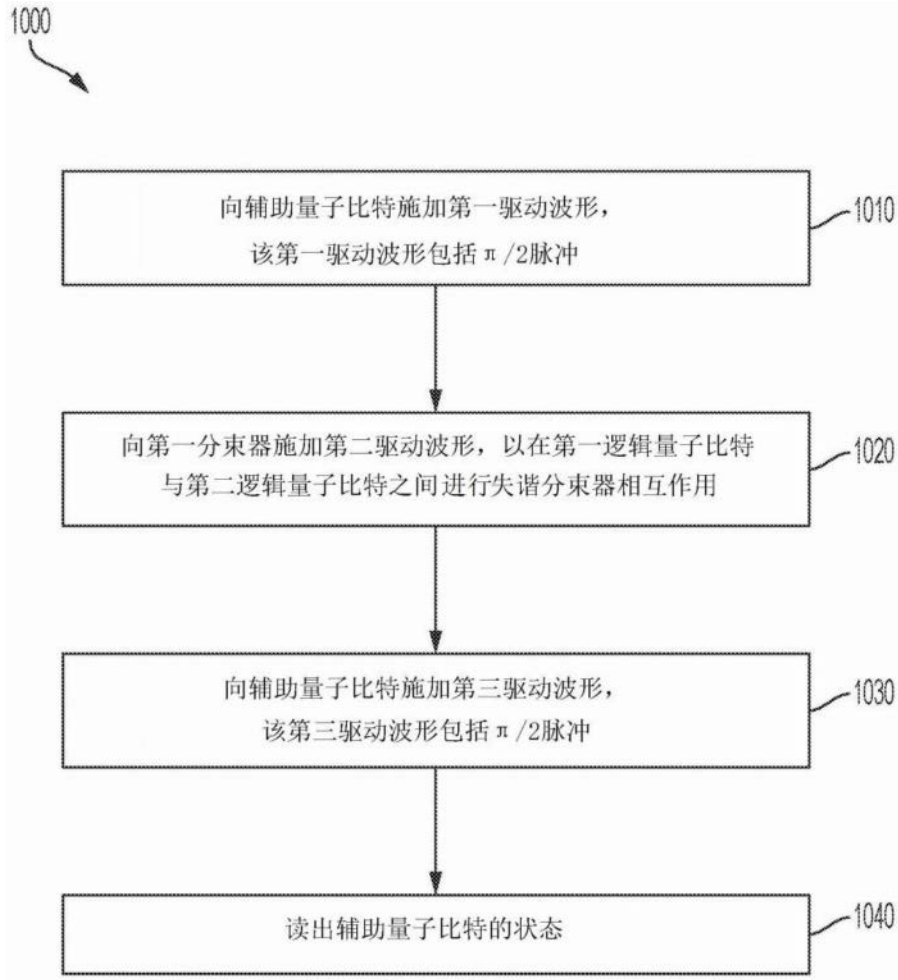


图10

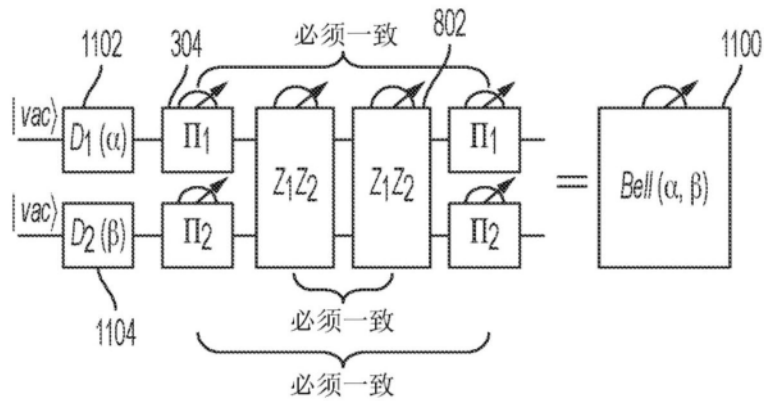


图11

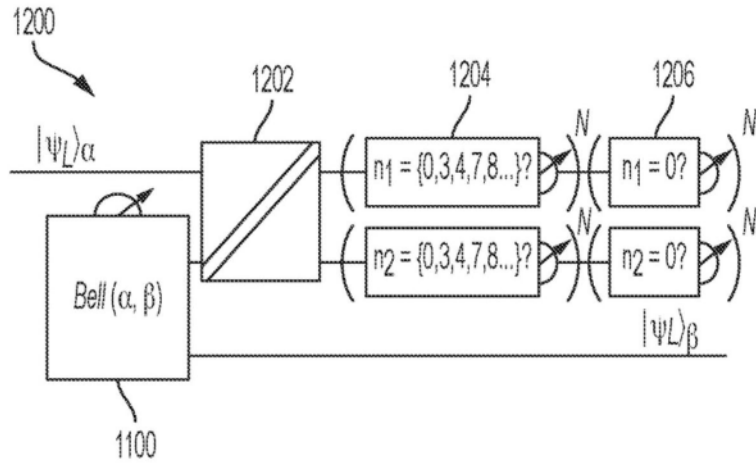


图12

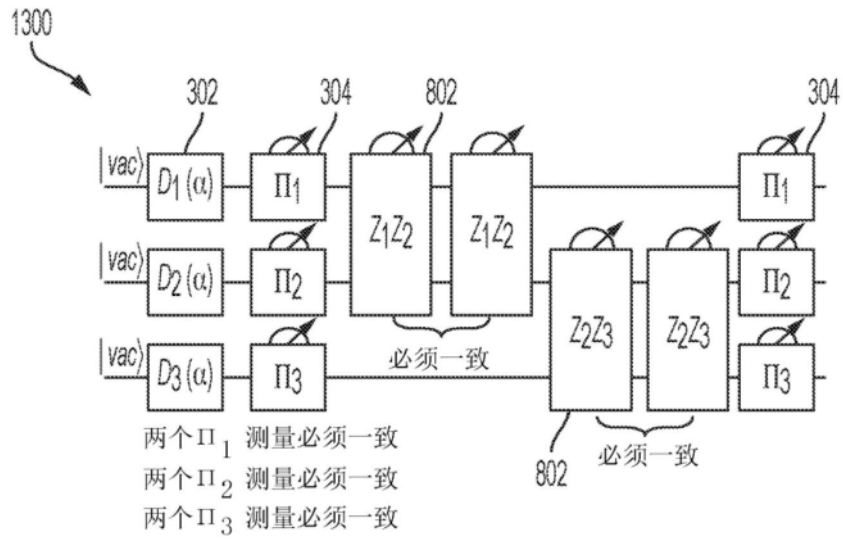


图13

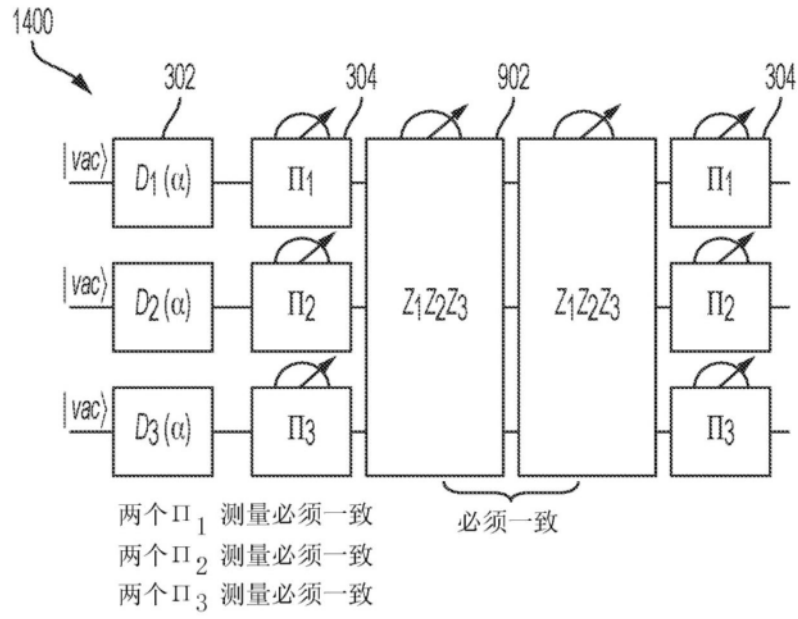


图14

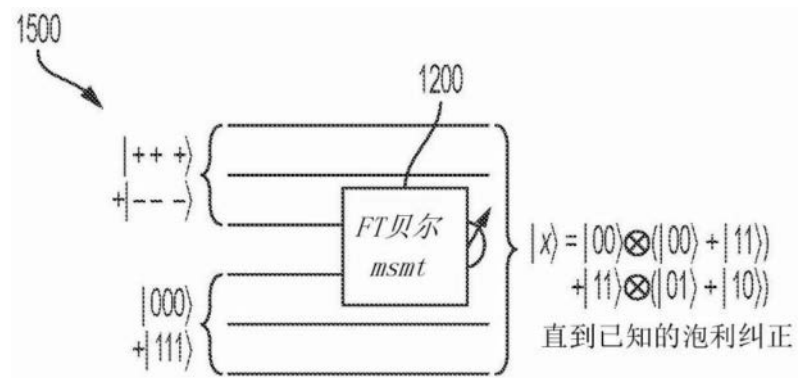


图15

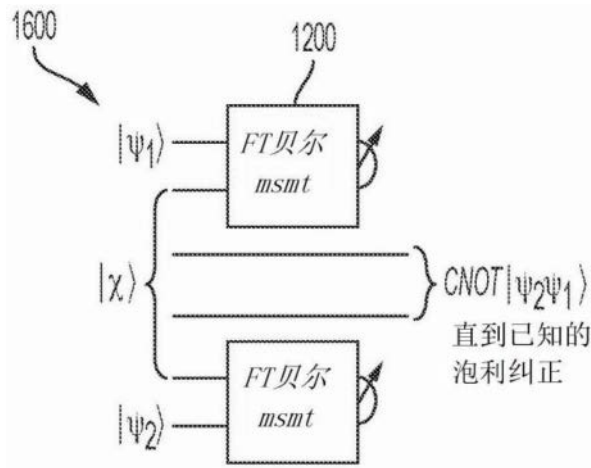


图16

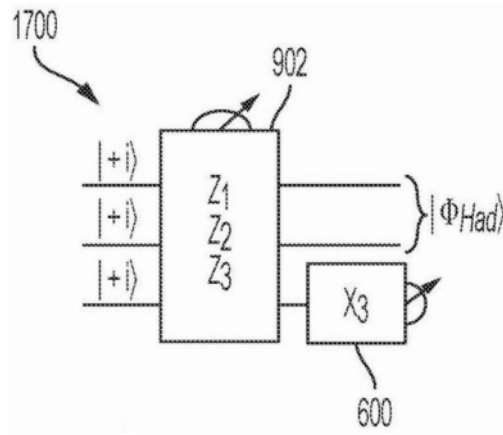


图17A

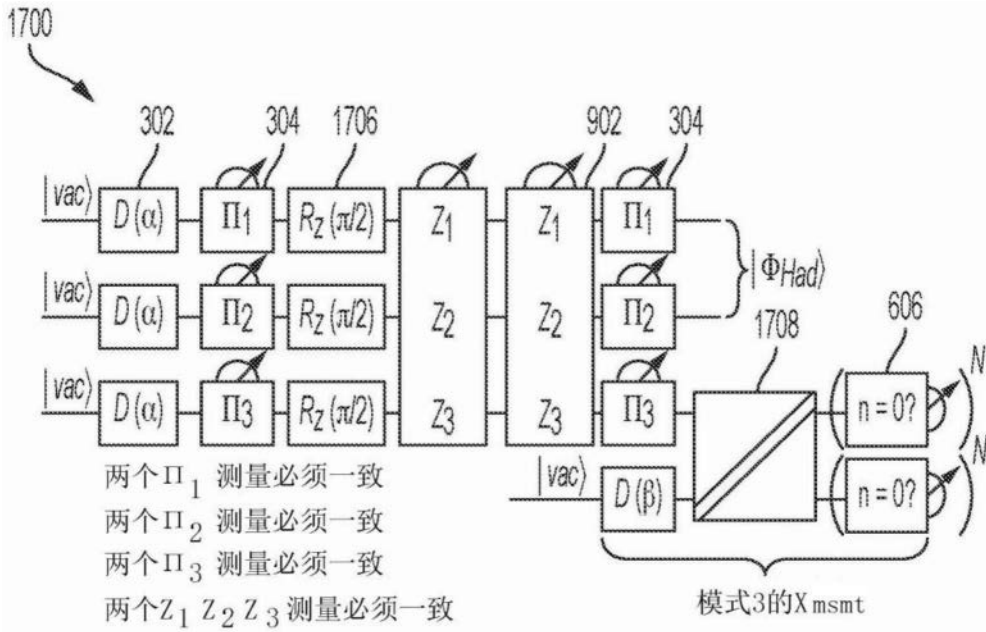


图17B

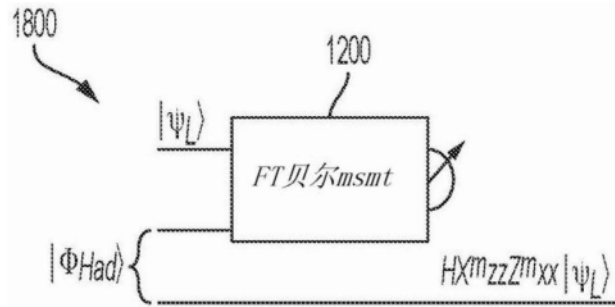


图18

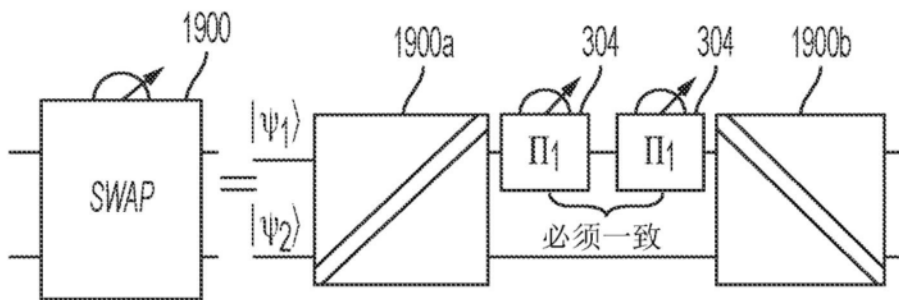


图19

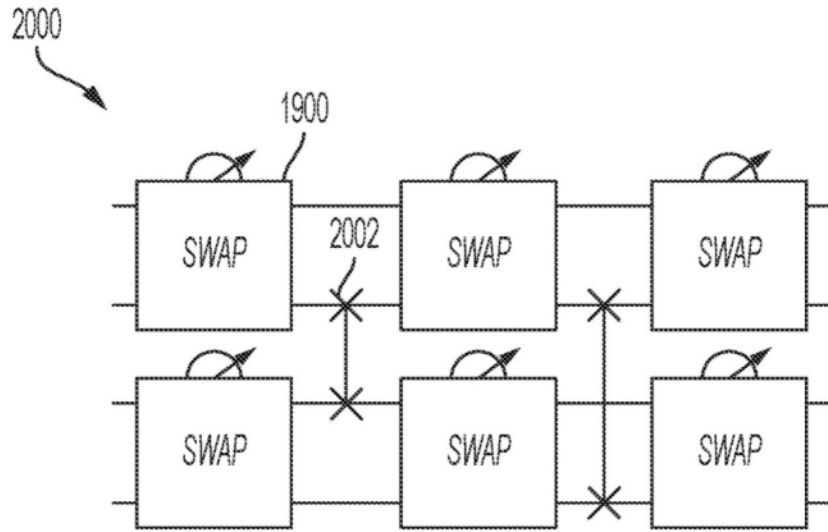


图20

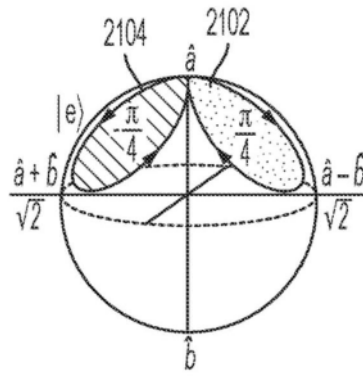


图21

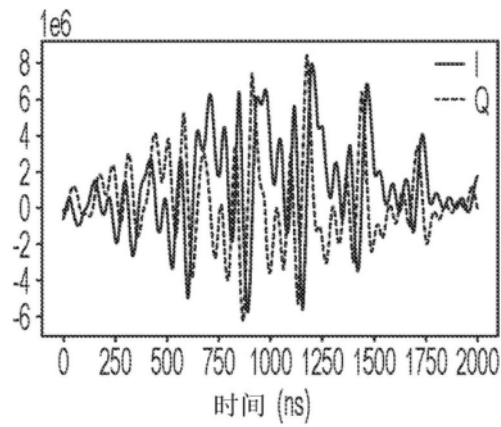


图22A

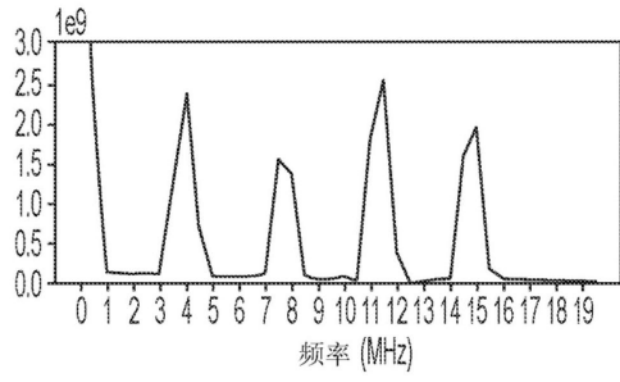


图22B

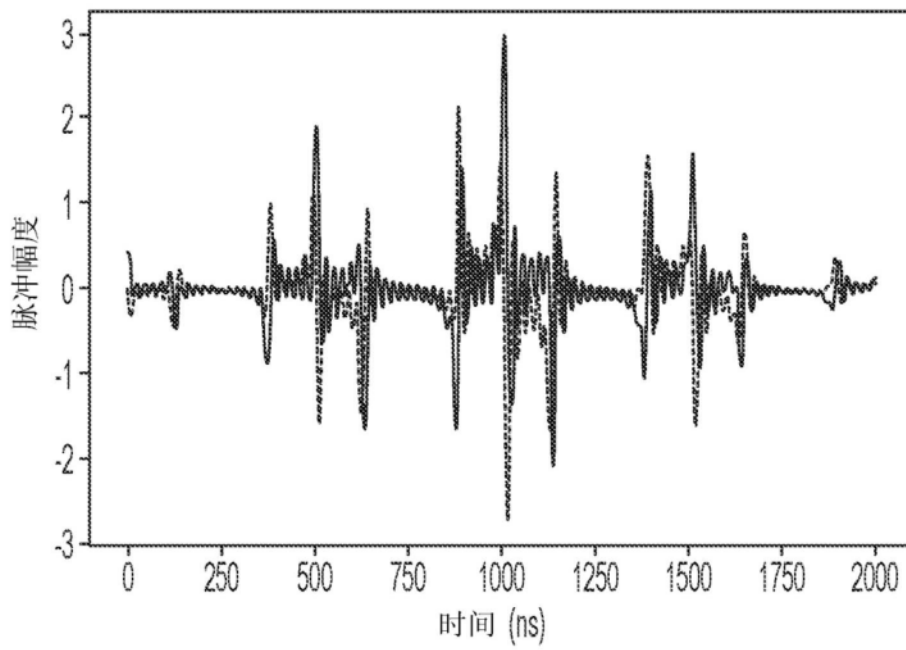


图23A

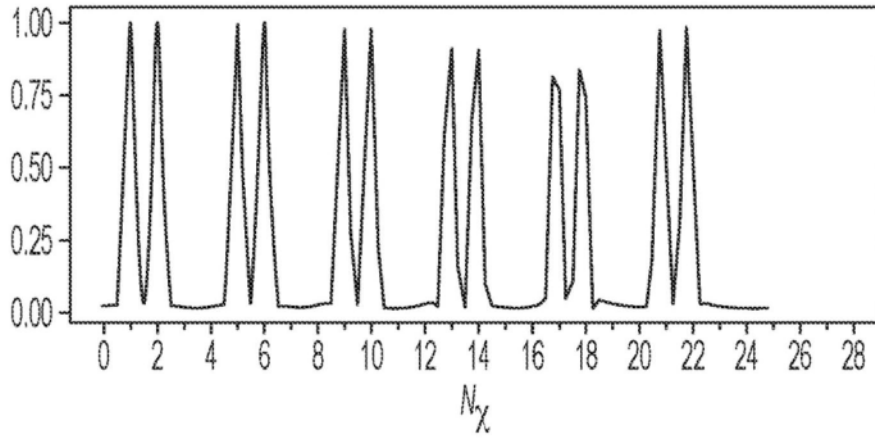


图23B

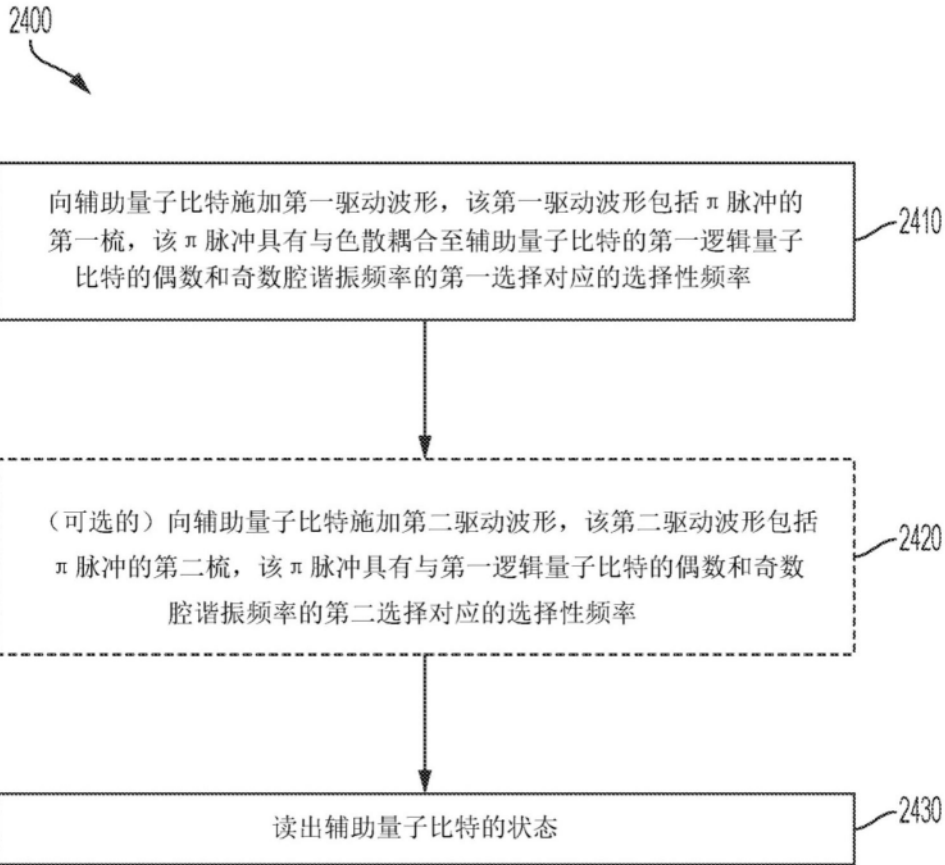


图24

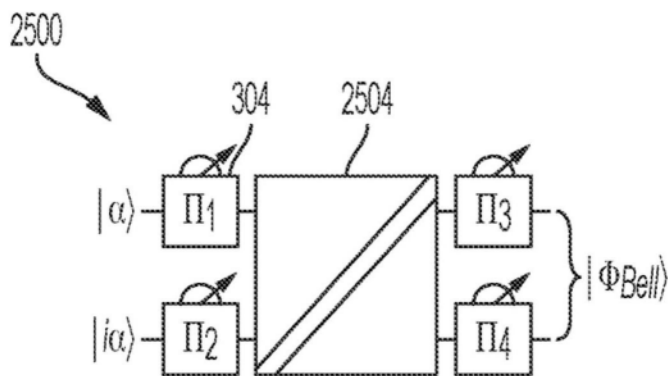


图25A

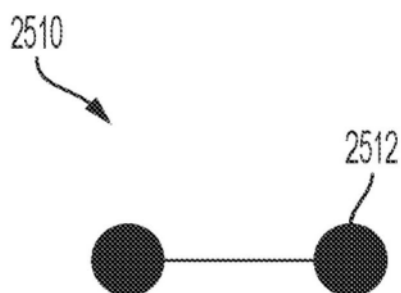


图25B

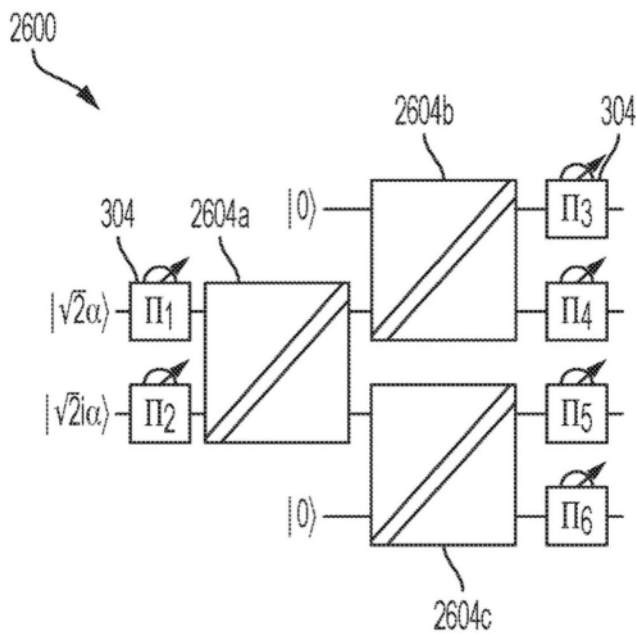


图26A

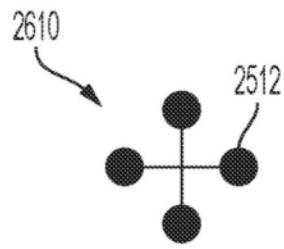


图26B

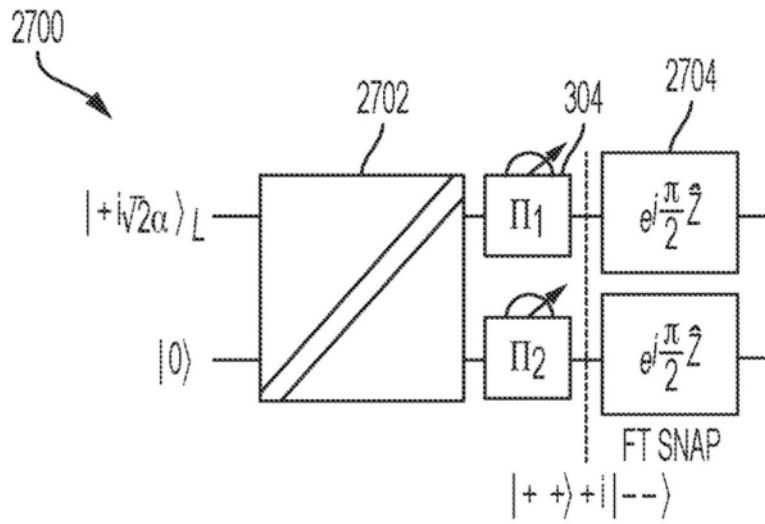


图27A

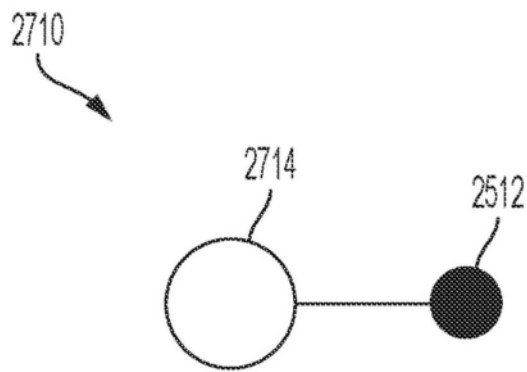


图27B

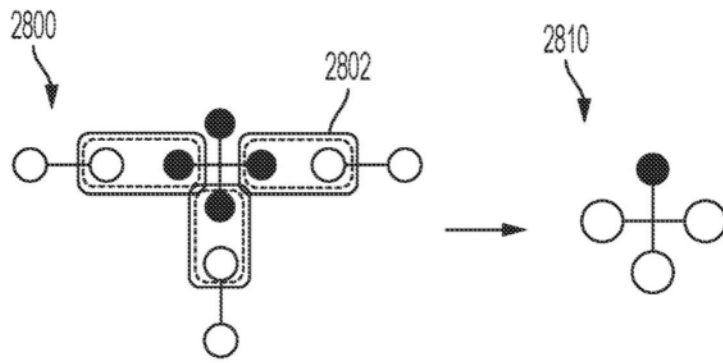


图28A

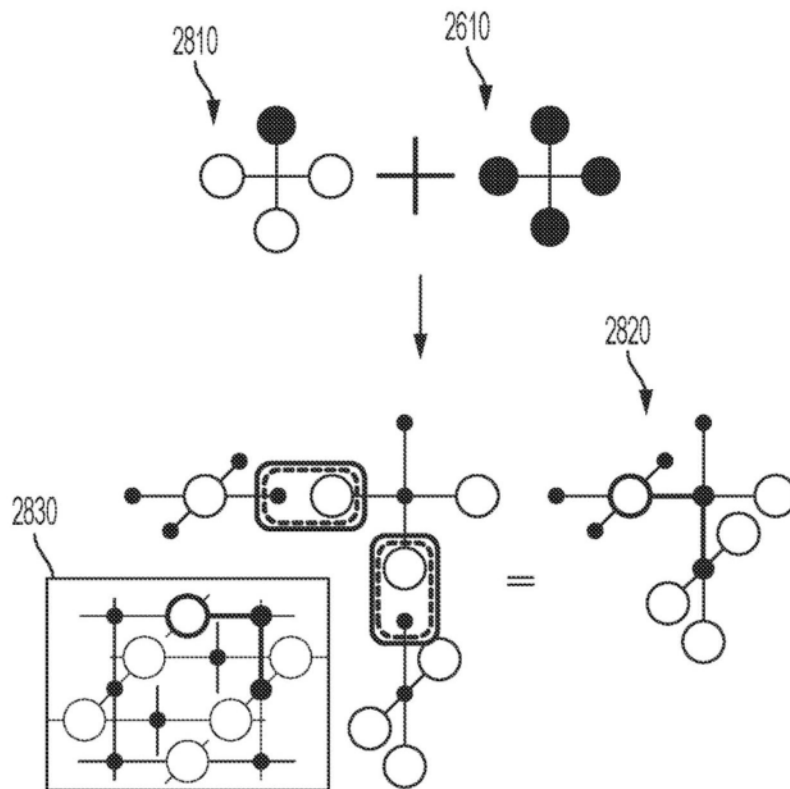


图28B

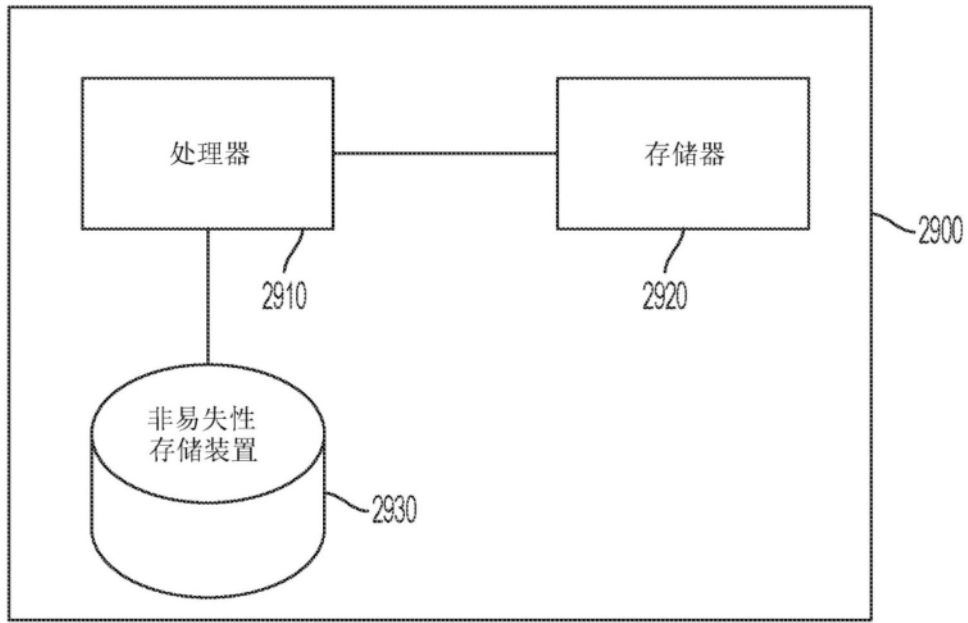


图29