



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108701261 A

(43)申请公布日 2018.10.23

(21)申请号 201580085007.0

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2015.10.29

G06N 99/00(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2018.05.31

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2015/057984 2015.10.29

(87)PCT国际申请的公布数据

W02017/074379 EN 2017.05.04

(71)申请人 谷歌有限责任公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 R.巴伦斯

(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 邵亚丽

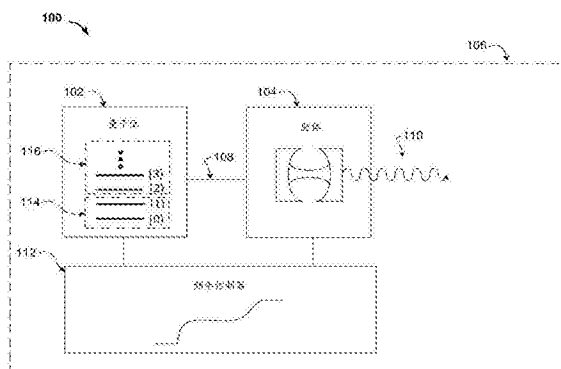
权利要求书3页 说明书9页 附图5页

(54)发明名称

去除量子位中的泄漏

(57)摘要

用于从量子位去除泄漏的装置和方法。在一个方面,一种装置包括一个或多个量子位,其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的占用,该量子位级别包括两个计算级别和各自高于计算级别的一个或多个非计算级别,其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁;腔体,其中该腔体限定腔体频率;一个或多个耦合器,其将每个量子位耦合到腔体;一个或多个耦合器,其将腔体耦合到一个或多个量子位和腔体的外部的环境;频率控制器,其控制每个量子位的频率,使得针对每个量子位,相对于腔体频率调节量子位的频率,使得非计算级别的布居被转移到腔体。



1. 一种装置,包括:

一个或多个量子位,其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的占用,所述量子位级别包括两个计算量子位级别和各自高于所述计算量子位级别的一个或多个非计算量子位级别,并且其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁;

腔体,其中所述腔体限定腔体频率;

一个或多个耦合器,其将每个量子位耦合到所述腔体;以及

一个或多个耦合器,其将所述腔体耦合到所述一个或多个量子位和所述腔体的外部的环境;

频率控制器,其控制量子位的频率,使得针对所述频率控制器控制的每个量子位,相对于所述腔体频率调节量子位的频率,使得非计算级别的布居被转移到腔体。

2. 根据权利要求1所述的装置,其中所述频率控制器针对每个量子位被配置为:

迭代地执行向下量子位级别跃迁直到达到最低计算量子位级别。

3. 根据权利要求2所述的装置,其中所述频率控制器被配置为针对处于或低于相关量子位级别的量子位迭代地执行向下量子位级别跃迁。

4. 根据权利要求2所述的装置,其中执行向下量子位级别跃迁包括:

将所述相关量子位跃迁频率对准到所述腔体频率;以及

保持所述对准预定量的时间。

5. 根据权利要求4所述的装置,其中保持所述对准预定量的时间导致到所述腔体的布居转移。

6. 根据权利要求1所述的装置,其中所述频率控制器针对每个量子位被配置为:

将量子位频率扫描经过所述腔体频率。

7. 根据权利要求6所述的装置,其中所述频率控制器被配置为将量子位频率扫描经过所述腔体频率,以针对处于或低于相关量子位级别的量子位执行向下量子位级别跃迁。

8. 根据权利要求7所述的装置,其中顺序地执行向下量子位级别跃迁直到达到最低计算量子位级别。

9. 根据权利要求4所述的装置,其中扫描量子位包括:

确定相对于所述腔体频率的量子位频率轨迹;

根据所述量子位频率轨迹移动量子位频率。

10. 根据权利要求9所述的装置,其中根据量子位频率轨迹移动量子位频率导致量子位跃迁频率顺序地变得与所述腔体频率对准,用于到腔体的布居转移。

11. 根据权利要求1所述的装置,其中所述环境由连接到负载的导线形成。

12. 根据权利要求11所述的装置,其中所述导线是读出线。

13. 根据权利要求1所述的装置,其中所述腔体是读出谐振器。

14. 根据权利要求1所述的装置,其中将所述腔体耦合到环境的耦合器是强的。

15. 根据权利要求1所述的装置,其中所述一个或多个量子位呈现弱非线性。

16. 一种方法,包括:

访问量子系统,所述量子系统包括:

一个或多个量子位,其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的

占用,所述量子位级别包括两个计算量子位级别和各自高于所述计算量子位级别的一个或多个非计算量子位级别,并且其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁;

腔体,其中所述腔体限定腔体频率;

一个或多个耦合器,其将每个量子位耦合到所述腔体;以及

一个或多个耦合器,其将所述腔体耦合到一个或多个量子位和腔体的外部的环境;

频率控制器,其控制量子位的频率,使得针对所述频率控制器控制的每个量子位,相对于所述腔体频率调节量子位的频率,使得非计算级别的布居被转移到所述腔体;以及

控制每个量子位的频率,使得针对每个量子位,相对于所述腔体频率来调节量子位的频率,使得非计算级别的布居被转移到所述腔体。

17. 根据权利要求16所述的方法,其中所述方法包括,针对每个量子位:

迭代地执行向下量子位级别跃迁,直到达到所述最低计算量子位级别,其中执行向下量子位级别跃迁包括:

将相关量子位跃迁频率对准到所述腔体频率;以及

等待预定量的时间。

18. 根据权利要求17所述的方法,其中等待预定量的时间导致到腔体的布居转移。

19. 根据权利要求17所述的方法,其中针对每个量子位迭代地执行向下量子位级别跃迁直到达到最低计算量子位级别是针对相似的量子位并行执行的。

20. 根据权利要求17所述的方法,其中所述预定量的时间被优化以实现有效的泄漏去除。

21. 根据权利要求16所述的方法,其中所述方法包括,针对每个量子位:

将量子位频率扫描经过所述腔体频率。

22. 根据权利要求21所述的方法,其中将量子位频率扫描经过所述腔体频率针对处于或低于相关量子位级别的量子位执行向下量子位级别跃迁。

23. 根据权利要求22所述的方法,其中顺序地执行所述向下量子位级别跃迁直到达到最低计算量子位级别。

24. 根据权利要求21所述的方法,其中针对相似的量子位,并行执行将量子位频率扫描经过所述腔体频率。

25. 根据权利要求21所述的方法,其中扫描量子位包括:

确定相对于所述腔体频率的量子位频率轨迹;

根据所述量子位频率轨迹移动量子位频率。

26. 根据权利要求25所述的方法,其中根据量子位频率轨迹移动量子位频率导致量子位跃迁频率顺序地变得与所述腔体频率对准,用于到腔体的布居转移,并且其中顺序地执行向下量子位级别跃迁,直到达到最低计算量子位级别。

27. 根据权利要求16所述的方法,其中不需要量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。

28. 根据权利要求16所述的方法,其中所述量子系统被提供用于量子计算。

29. 根据权利要求28所述的方法,其中在量子计算中的一个或多个计算操作之后重复执行所述方法,其中所述计算操作的最后步骤是测量操作。

30. 根据权利要求29所述的方法,其中不需要量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。

31. 根据权利要求16所述的方法,其中紧接在与量子计算中的一个或多个计算操作相关联的测量操作之前重复执行所述方法。

32. 一种方法,包括:

响应于在量子系统中执行计算,所述量子系统包括:

一个或多个量子位,其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的占用,所述量子位级别包括两个计算量子位级别和各自高于所述计算量子位级别的一个或多个非计算量子位级别,并且其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁;

腔体,其中所述腔体限定腔体频率;以及

频率控制器,其控制量子位的频率,使得针对所述频率控制器控制的每个量子位,相对于所述腔体频率调节量子位的频率,使得非计算级别的布居被转移到所述腔体;

在没有量子位级别的布居的先验知识的情况下,控制所述频率控制器控制的每个量子位的频率,使得针对所述频率控制器控制的每个量子位,相对于所述腔体频率调节量子位的频率,使得非计算级别的布居转移到所述腔体。

去除量子位中的泄漏

背景技术

[0001] 去除量子位的寄生占用是量子计算以及其它应用中的任务。

发明内容

[0002] 本说明书描述了涉及用于使用阻尼腔体模式去除量子位(量子位, qubit)中较高级别的寄生占用(例如, 泄漏)而不需要量子位状态的先验知识的量子硬件以及方法的技术。通过将量子位的频率移动接近阻尼腔体频率, 较高级别的寄生占用将转移到腔体。使用阻尼腔体模式可以在腔体中阻尼寄生占用。

[0003] 通常, 本说明书中描述的主题的一个创新性方面可体现在包括访问量子系统的动作的方法中, 所述量子系统包括: 一个或多个量子位, 其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的占用, 所述量子位级别包括两个计算量子位级别和各自高于计算量子位级别的一个或多个非计算量子位级别, 并且其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁; 腔体, 其中该腔体限定腔体频率; 一个或多个耦合器, 其将每个量子位耦合到腔体; 以及一个或多个耦合器, 其将腔体耦合到一个或多个量子位和腔体的外部的环境; 频率控制器, 其控制量子位的频率, 使得针对频率控制器控制的每个量子位, 相对于腔体频率调节量子位的频率, 使得非计算级别的布居(population)可被转移到腔体。所述方法中的动作还包括控制每个量子位的频率, 使得针对每个量子位, 相对于腔体频率来调节量子位的频率, 使得非计算级别的布居可以被转移到腔体。

[0004] 前述和其它实施方式可以单独或组合地各自可选地包括以下特征中的一个或多个。在一些实施方式中, 该方法包括访问量子系统的动作, 所述量子系统包括: 一个或多个量子位, 其中每个量子位促进多个量子位级别中的至少一个量子位级别的占用, 量子位级别包括两个计算量子位级别和各自高于计算量子位级别的一个或多个非计算量子位级别, 并且其中量子位促进与对应的跃迁频率相关联的量子位级别之间的跃迁; 腔体, 其中腔体限定腔体频率; 一个或多个耦合器, 其将每个量子位耦合到腔体; 以及一个或多个耦合器, 其将腔体耦合到一个或多个量子位和腔体的外部的环境; 频率控制器, 其控制量子位的频率, 使得针对频率控制器控制的每个量子位, 相对于腔体频率调节量子位的频率, 使得非计算级别的布居被转移到腔体; 所述方法中的动作还包括控制每个量子位的频率, 使得针对每个量子位, 相对于腔体频率来调节量子位的频率, 使得非计算级别的布居被转移到腔体。

[0005] 在其它实施方式中, 针对每个量子位, 该方法包括: 迭代地执行向下量子位级别跃迁, 直到达到最低计算量子位级别, 其中执行向下量子位级别跃迁包括: 将相关量子位跃迁频率对准到腔体频率; 以及等待预定量的时间。

[0006] 在一些情况下, 等待预定量的时间导致到腔体的布居转移。

[0007] 在其它情况下, 迭代地执行向下量子位级别跃迁直到针对每个量子位达到最低计算量子位级别是针对相似量子位并行执行的。

[0008] 在一些实施方式中, 预定量的时间被优化以实现有效的泄漏去除。

[0009] 在其它实施方式中, 针对每个量子位, 该方法包括: 将量子位频率扫描经过腔体频

率。

[0010] 在一些实施方式中,将量子位频率扫描经过腔体频率针对处于或低于相关量子位级别的量子位执行向下量子位级别跃迁。

[0011] 在一些情况下,顺序地执行向下量子位级别跃迁直到达到最低计算量子位级别。

[0012] 在一些实施方式中,针对相似的量子位,并行地执行将量子位频率扫描经过腔体频率。

[0013] 在其它实施方式中,扫描量子位包括:确定相对于腔体频率的量子位频率轨迹;根据量子位频率轨迹移动量子位频率。

[0014] 在一些情况下,根据量子位频率轨迹移动量子位频率导致量子位跃迁频率顺序地变得与腔体频率对准,用于到腔体的布居转移,并且其中顺序地执行向下量子位级别跃迁,直到达到最低计算量子位级别。

[0015] 在一些情况下,不需要量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。

[0016] 在一些情况下,量子系统被提供用于量子计算。

[0017] 在一些实施方式中,在量子计算中的一个或多个计算操作之后重复执行该方法,其中计算操作的最后步骤是测量操作。

[0018] 在一些情况下,该方法紧接在与量子计算中的一个或多个计算操作相关联的测量操作之前重复执行。

[0019] 在其它实施方式中,不需要量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。

[0020] 本说明书中描述的主题可以在特定实施例中实现,以便实现以下优点中的一个或多个。

[0021] 在一些示例中,测量量子位的状态并向前馈送(feed forward)允许量子位被设定为特定状态。这种过程的主要难题是在算法操作期间量子位的较高级别可能会变得被布居。量子位的较高级别不能被准确地读出并缓慢衰减,导致计算子空间之外的量子位级别的显著占用,因此妨碍了量子计算算法的实现。使用阻尼腔体去除量子位中的泄漏的系统使能多级别量子位的重置,从而减少量子计算中使用的量子位中更高级别的泄漏状态的占用并且提高这种量子计算的效率和性能。

[0022] 使用阻尼腔体去除量子位中的泄漏的系统可以包括容易获得的例如大约100MHz的量子位-腔体耦合强度,使能用于在几十纳秒中执行去除泄漏的操作。因此,用于去除泄漏的操作仅在量子位参与的量子计算中增加了小的时间开销。因此,与用于去除量子位中的泄漏的其它方法相比,使用阻尼腔体去除量子位中的泄漏的系统可以实现提高的计算效率。

[0023] 与用于去除量子位中的泄漏的其它方法相比,使用阻尼腔体去除量子位中的泄漏的系统可能需要更少的硬件组件。虽然可以插入单独的腔体以执行去除量子位中的泄漏,但是现有的读出谐振器可以用作阻尼腔体,因为用于泄漏去除的读出谐振器和阻尼腔体都需要强耦合到环境,以便允许快速读出和阻尼。

[0024] 由于可以用于去除较高量子位级别的占用的量子位轨迹的持续时间、频率和形状可以以简单的方式优化以在短时间尺度内实现有效的泄漏去除,因此使用阻尼腔体去除量子位中的泄漏的系统可以实现高级别的鲁棒性和效率。

[0025] 在附图和下面的描述中阐述了本说明书的主题的一个或多个实施方式的细节。主题的其它特征、方面和优点将从描述、附图和权利要求中变得显而易见。

附图说明

- [0026] 图1描绘了用于去除量子位中的泄漏的示例系统。
[0027] 图2是使用阶梯式方法去除量子位中的泄漏的示例过程的流程图。
[0028] 图3是使用扫描方法去除量子位中的泄漏的示例过程的流程图。
[0029] 图4是使用阶梯式方法的示例量子位重置的图示。
[0030] 图5是使用扫描方法的示例量子位重置的图示。
[0031] 图6A描绘了示例量子位轨迹。
[0032] 图6B描绘了作为时间的函数的与量子位基态的示例偏差。
[0033] 各附图中相同的附图标记和指定指示相同的元件。

具体实施方式

[0034] 本说明书描述了一种体系结构和方法,用于在不需要量子位状态的先验知识的情况下使用阻尼腔体去除量子位中较高级别的占用。

[0035] 通常,测量量子位的状态并取决于该状态施加跃迁脉冲(transition pulse),允许量子位被设定为特定状态。然而,主要的难题可能是在算法操作期间量子位的较高级别,诸如2-态和3-态可能变得被布居(populated)。这些较高级别不能被准确读出,并且缓慢衰减(decay)。结果,计算子空间之外的量子位级别可能累积显著的占用,妨碍诸如量子纠错操作的程序的实施。该效应可能尤其存在于具有弱非线性的量子位中,其中能量级别足够接近以至于它们容易变得被布居。

[0036] 用于去除量子位的寄生占用(例如,执行量子位重置)的操作因此是量子位可控性和量子硬件的关键要素。该说明书详述了去除量子位中较高级别的占用的两种方法。首先,描述了一种阶梯式方法,其中每个跃迁频率与腔体频率对准。其次,描述了扫描方法,其中量子位在频率上被扫描经过腔体。这两种方法都能使较高级别的布居转移到腔体中,在那里其被阻尼(damp)。

[0037] 示例操作环境

[0038] 图1描绘了用于去除量子位中的泄漏的示例系统100。系统100包括一个或多个量子位102、频率控制器112以及腔体104,所述腔体104与一个或多个量子位102、频率控制器112以及在一个或多个量子位102、频率控制器112和腔体104外部的环境106相互作用。

[0039] 一个或多个量子位102各自促进一组量子位级别中的至少一个量子位级别的占用。例如,如果一个或多个量子位是原子,则一组量子位级别中的一个量子位级别的占用对应于电子占用原子的能量级别。量子位级别包括两个计算量子位级别114,例如级别0-和1-,以及各自高于计算量子位级别114的一个或多个非计算级别116,例如级别2-和3-。这些较高的非计算级别通常缓慢衰减。

[0040] 一个或多个量子位102是频率可调的并且各自促进量子位级别之间的跃迁,例如从级别3-到2-、2-到1-和1-到0-的跃迁。量子位级别之间的每个跃迁可以与对应的跃迁频率相关联。在一些实施方式中,一个或多个量子位102可以表现出弱非线性,其中计算子空

间之外的量子位级别可以累积显著的占用。例如,在弱非线性的情况下,高于计算量子位级别的量子位级别之间的间隔可能不会显著改变,这可能导致跃迁为这种量子位级别的概率不可忽略。一个或多个量子位102可以包括但不限于超导量子位或半导体量子位。

[0041] 一个或多个量子位102可以被有效地用于执行算法操作或量子计算。然而,较高的非计算量子位级别的布居可能在这些操作或计算中引入错误。例如,在计算子空间之外的量子位级别的占用可能妨碍或阻止量子纠错操作的实现。因此,一个或多个量子位可能需要量子位重置操作,其中量子位级别之间的向下跃迁被执行直到达到最低量子位级别。下面参考图2和图3更详细地描述量子位重置操作。

[0042] 一个或多个量子位102中的每一个经由相应的耦合器(例如,耦合器108)耦合到腔体104。原则上,相应的耦合器可以是任何类型的耦合器,例如电容耦合器。电容耦合器可以通过将量子位的臂和腔体的末端放置得非常靠近并使用爪状耦合器(claw-like coupler)来实现。将一个或多个量子位102耦合到腔体104的耦合器是可控的。例如,将一个或多个量子位102耦合到腔体104的耦合器的强度可以是频率可控的。耦合器是可控的,使得电容可以是固定的。然后,耦合可能弱取决于频率,并且量子位和腔体之间的相互作用可以通过将量子位频率引向或远离腔体频率来实现。

[0043] 腔体104可通过一个或多个耦合器(例如,耦合器110)耦合到在一个或多个量子位104外部的环境106。在一些实施方式中,腔体104到环境106的耦合可能是强的。由于腔体104与环境106的相互作用,腔体104可能被阻尼。例如,腔体104到环境106的耦合可能导致衰减,诸如以速率 Γ 从腔体的激发状态到真空模式的衰减以及以速率 κ 的腔体的场模式的衰减。如果耦合强,也就是 $\Gamma, \kappa \gg g$,其中 g 是腔体-环境耦合常数,则可以预期强衰减和不相干演化(no coherent evolution)。如果耦合弱,也就是 $\Gamma, \kappa \ll g$,则相干演化占主导地位,例如直到消相(dephasing)破坏相干演化。环境106可以由连接到负载的导线形成。在一些实施方式中,导线是读出线。

[0044] 腔体104限定腔体频率。在一些实施方式中,腔体104可以是在系统100中包括的用于去除来自一个或多个量子位104的泄漏的目的的单独的腔体。在其它实施方式中,可以通过允许读出谐振器充当阻尼腔体来减少硬件开销。

[0045] 频率控制器112控制一个或多个量子位102中的每一个量子位的频率。频率控制器112控制一个或多个量子位102中的每一个量子位的频率,使得针对每个量子位,可以相对于腔体频率调节量子位的频率,并且非计算级别的布居可以转移到腔体。

[0046] 频率控制器112可以被配置为确定每个量子位的最大相关占用级别。频率控制器也可以被配置为调谐每个量子位的跃迁频率,使得执行向下量子位级别跃迁。例如,频率控制器112可以将3-级别确定为量子位的最大相关占用级别,并执行向下量子位级别跃迁直到量子位被重置,例如达到0-级别。为了执行向下量子位级别跃迁,例如从3-级别到2-级别的量子位级别跃迁,频率控制器可以被配置为将相关量子位跃迁频率(例如,量子位跃迁频率 f_{32})与腔体频率对准并且保持对准预定量的时间,这导致向腔体的布居转移,在那里其可以被阻尼。下面参考图2和图3更详细地描述使用频率控制器执行向下量子位级别跃迁。

[0047] 频率控制器112还可以被配置为将一个或多个量子位的频率扫描经过腔体频率以执行向下量子位级别跃迁。例如,频率控制器112可以将3-级别确定为量子位的最大相关占用级别,并且通过将每个量子位频率扫描经过腔体频率来执行向下量子位级别跃迁,直到

量子位被重置。频率控制器可以被配置为通过确定使得量子位跃迁频率可以顺序地变得与腔体频率对准的相对于腔体频率的相应量子位频率轨迹来将每个量子位频率扫描经过腔体频率,用于向腔体的布居转移,在那里其可以被阻尼。频率控制器也可以被配置为根据相应的量子位频率轨迹移动每个量子位频率。顺序地执行向下量子位级别跃迁,直到达到最低计算量子位级别。下面参考图2和图3更详细地描述使用频率控制器执行向下量子位级别跃迁。

[0048] 从较高量子位级别去除占用

[0049] 图2是使用阶梯式方法去除量子位中的泄漏的示例过程200的流程图。例如,过程200可以由上面参考图1描述的系统100的频率控制器112执行。为了方便,过程200被描述为去除单个量子位中的泄漏。然而,可以针对包括多个量子位的系统并行执行过程200。

[0050] 频率控制器迭代地执行向下量子位级别跃迁(步骤202)。在一些实施方式中,频率控制器可以确定相关最大量子位级别。量子位级别的数量可能很大,因此频率控制器根据关注的系统确定忽略阈值以上的量子位级别的任何占用的相关最大量子位级别。例如,频率控制器可以确定最大量子位级别是3-级别,并且量子位应该被重置为0-级别。因此,频率控制器将迭代地从3-级别起执行向下量子位级别跃迁,即针对处于或低于相关量子位级别的每个量子位执行从3-到2-、2-到1-和1-到0-的跃迁,直到量子位被重置。

[0051] 为了执行向下量子位级别跃迁,频率控制器调节每个相应的量子位跃迁频率并将其对准到腔体频率(步骤204)。频率控制器从最高量子位级别跃迁开始。例如,为了执行从3-级别到2-级别的跃迁,频率控制器将量子位的跃迁频率 f_{32} 对准腔体频率。

[0052] 频率控制器保持对准用于量子位级别的布居转移到腔体(步骤206)。例如,频率控制器可以将量子位跃迁频率 f_{32} 对准到腔体频率并且保持对准,直到3-级别的布居可以转移到腔体。频率控制器将量子位频率到腔体频率的对准保持预定量的时间。预定量的时间可以是已经优化的预定量的时间,以使用标准优化技术(例如,单纯形算法、梯度下降算法或拉格朗日方法)来实现有效的泄漏去除。一旦量子位级别的布居已经转移到腔体,频率控制器迭代地重复步骤(204)和(206),直到已经执行了所有向下量子位级别跃迁。

[0053] 频率控制器实现量子位的重置(步骤208)。下面参考图4进一步描述使用具有阶梯式方法的阻尼腔体来重置量子位。如以上参考图1所述,实现这里描述的过程200的量子系统可以在量子计算中有效或被提供用于量子计算。在这种设置中,可以紧接在与量子计算中的计算操作相关联的一个或多个测量操作之前或之后重复执行步骤(202)至(208)。

[0054] 过程200不要求量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。例如,如果紧接在与量子计算中的计算操作相关联的测量操作之前重复执行过程200,则过程可以从所确定的最大量子位级别起顺序地执行对准,直到可以达到最高计算级别。在这种情况下,0-状态将保持为0-状态,并且理想的1-状态将保持为1-状态。只在计算级别0-和1-中占用的量子位将不会受到影响。在另一个示例中,如果在与量子计算中的计算操作相关联的测量操作之后重复执行过程200,则即使与计算操作相关联的测量操作误报,或者导致较高级别中的布居,过程也可以是鲁棒的。

[0055] 图3是使用扫描方法去除量子位中的泄漏的示例过程300的流程图。例如,过程300可以由上面参考图1描述的系统100的频率控制器112执行。为了方便,过程300被描述为去除单个量子位中的泄漏。然而,可以针对包括多个量子位的系统并行执行过程300。

[0056] 频率控制器将量子位频率扫描经过腔体频率(步骤302)。在一些实施方式中,频率控制器确定最大量子位级别。量子位级别的数量可能很大,因此频率控制器根据关注的系统确定忽略阈值以上的量子位级别的任何占用的相关最大量子位级别。例如,频率控制器可以确定最大量子位级别是3-级别,并且量子位应该被重置为0-级别。因此频率控制器要将量子位频率扫描经过腔体,将相关能量级别移动到接近腔体频率,直到可以达到最低计算量子位级别并且量子位被重置。如下面参考图6和图7进一步讨论的,当以频率表达的量子位-腔体耦合强度近似于或超过扫描持续时间的倒数时,并且当腔体阻尼率近似于或超过耦合强度时,该过程可获得高保真度。

[0057] 为了将量子位频率扫描经过腔体频率,频率控制器确定量子位频率轨迹(步骤304)。量子位频率轨迹的持续时间、频率和形状可以使用优化技术和最优控制理论来确定,该理论使能短时间尺度(timescale)内的有效泄漏去除。下面参考图6描述示例量子位频率轨迹。

[0058] 频率控制器根据确定的量子位频率轨迹移动量子位频率(步骤306)。频率控制器根据所确定的量子位频率轨迹移动或扫描量子位频率,使得量子位跃迁频率变得与腔体频率顺序地对准,用于到腔体的布居转移,在那里其可以被阻尼。在扫描期间,顺序执行向下量子位级别跃迁直到可以达到最低计算量子位级别。频率控制器可以针对处于或低于相关量子位级别的每个量子位执行扫描。

[0059] 频率控制器实现量子位重置(步骤308)。下面参考图5至图7进一步描述使用阻尼腔体用扫描方法来重置量子位。如上面参考图1所述,实现这里描述的过程300的量子系统可以在量子计算中有效或被提供用于量子计算。在这种设置中,步骤(304)至(308)可以紧接在与量子计算中的计算操作相关联的一个或多个测量操作之前或之后重复执行。

[0060] 如果在与量子计算中的计算操作相关联的测量操作之后执行过程300,则过程300不要求量子位状态中的每一个量子位状态的布居的先验知识。即使与计算操作相关联的测量操作误报,或者导致较高级别中的布居,该过程仍可能是鲁棒的。然而,因为过程300是多级别同时交换,所以该过程在非计算较高级别以及激发的计算级别(例如,1-级别)中丢失任何量子位布居,从而破坏关注的信息,因为测量操作的结果将始终指示0-状态。

[0061] 图4是使用阶梯式方法的示例量子位重置的图示400。例如,上面参考图2描述的过程200可被使用,以便执行量子位重置。图示400示出从3-级别到0-级别的示例量子位重置。如上所述,也可以考虑使用阶梯式方法对其它级别中的量子位进行量子位重置。

[0062] 在量子位重置操作的持续时间内,量子位频率 f 被绘制为时间 t 的函数。量子位的1-状态到0-状态跃迁频率 f_{10} 遵循阶梯样式,反映了不同级别到腔体频率 f_{cavity} 的对准。首先,3-状态到2-状态的跃迁频率 f_{32} 被对准到腔体频率 f_{cavity} ,允许量子位达到第二激发级别。接下来,2-状态到1-状态跃迁频率 f_{21} 被对准到腔体频率 f_{cavity} ,允许量子位达到第一激发级别。随后将1-状态到0-状态跃迁频率 f_{10} 对准到腔体频率 f_{cavity} ,允许量子位达到基态,将量子位重置。实量子位跃迁频率线示出可能的占用的跃迁。灰色的虚线示出清空的跃迁。在示例图示400中,针对0-、1-、2-或3-状态中的量子位,最终结果是基态0-。如果需要包括3-状态以上的级别,则重置过程和图示400将以相关级别的跃迁频率开始。

[0063] 图5是使用扫描方法的示例量子位重置的图示500。例如,上面参考图3描述的过程300可被使用,以便执行量子位重置。图示500示出从3-级别到0-级别的示例量子位重置。如

上所述,也可以考虑使用扫描方法针对其它级别中的量子位进行量子位重置。

[0064] 在量子位重置操作的持续时间内,量子位跃迁频率 f_{10} 被绘制为时间 t 的函数。相关量子位跃迁频率被扫描经过处于频率 f_{cavity} 的腔体,使得相关能量级别与腔体频率 f_{cavity} 对准。实量子位跃迁频率线示出可能的占用的跃迁。灰色的虚线示出清空的跃迁。当以频率表达的量子位-腔体耦合强度近似于或超过扫描持续时间的倒数时,并且当腔体阻尼率近似于或超过耦合强度时,使用诸如图5所示的扫描方法的量子位重置可以高保真度执行。更多细节请参见下面的图6A和图6B。

[0065] 在示例图示500中,针对0-、1-、2-或3-状态中的量子位,最终结果是基态0-。如果需要包括3-状态以上的级别,则重置过程和图示500将包括将所述较高级别扫描经过腔体。下面参考图6A和图6B更详细地描述用于使用扫描方法来执行量子位重置的量子位轨迹。

[0066] 图6A描绘了用于从量子位去除泄漏的扫描方法中的示例量子位频率轨迹600。例如,量子位频率轨迹可以对应于在用于使用参考图3描述的扫描方法去除量子位中的泄漏的示例过程300的步骤306中通过图1的频率控制器112确定的量子位频率轨迹。

[0067] 量子位频率轨迹600以量子位-腔体耦合强度 g 为单位相对于腔体频率绘制。量子位频率轨迹600示出在将量子位频率移动经过腔体之后,可以将量子位频率以快速斜坡(fast ramp)向下移动到其起始频率。寄生交换可能发生,例如量子可能移动回到量子位中,但是这种交换可能是快速时间尺度的二阶过程,这种时间尺度是诸如 $1/\kappa$ 量级的时间尺度,其中 κ 是腔体阻尼率,以及这种交换可以通过快速斜坡来最小化。然而,如果斜坡不能足够快,例如由于电子学的限制,则该过程可能通过等待腔体去布居(depoulate)而继续。

[0068] 图6B是作为时间的函数的与量子位基态的偏差的示例曲线图650。曲线图650示出针对1-、2-和3-状态的约0.1%至1%的偏差,其中使用量子位-腔体耦合 $g/2\pi=100\text{MHz}$ 、腔体阻尼率 $\kappa=1/25\text{ns}$ 和量子位非线性 220MHz 执行计算。使用四个谐振器级别和四个量子位级别执行仿真。

[0069] 本说明书中描述的数字和/或量子主题以及数字函数操作和量子操作的实施例可以实施在数字电子电路、合适的量子电路或者更一般地量子计算系统中,在有形体现的数字和/或量子计算机软件或固件中,在数字和/或量子计算机硬件中,包括本说明书中公开的结构及其结构等同物,或它们中一个或多个的组合。术语“量子计算系统”可以包括但不限于量子计算机、量子信息处理系统、量子密码系统或量子模拟器。

[0070] 本说明书中描述的数字和/或量子主题的实施例可以被实现为一个或多个数字和/或量子计算机程序,即在有形的非暂态存储介质上编码的数字和/或量子计算机程序指令的一个或多个模块,用于由数据处理装置执行或控制数据处理装置的操作。数字和/或量子计算机存储介质可以是机器可读存储设备、机器可读存储基板、随机或串行存取存储设备、一个或多个量子位或它们中的一个或多个的组合。可替代地或附加地,程序指令可以被编码在人工生成的传播信号上,该信号能够对数字和/或量子信息(例如机器生成的电、光或电磁信号)进行编码,该信号被生成以编码数字和/或量子信息,用于传输给合适的接收机装置以供数据处理装置执行。

[0071] 术语量子信息和量子数据是指由量子系统携带、保持或存储的信息或数据,其中最小的非平凡系统是量子位,即定义量子信息单位的系统。可以理解的是,术语“量子位”包括可以在相应的上下文中适当地近似为两级别系统的所有量子系统。这种量子系统可以包

括多级系统,例如具有两个或更多个级别。举例来说,这种系统可以包括原子、电子、光子、离子或超导量子位。在许多实施方式中,计算基础状态用基态和第一激发状态来识别,然而应该理解,计算状态用较高级别激发状态来识别的其它设置是可能的。

[0072] 术语“数据处理装置”是指数字和/或量子数据处理硬件,并且包括用于处理数字和/或量子数据的所有种类的装置、设备和机器,包括例如可编程数字处理器、可编程量子处理器、数字计算机、量子计算机或多个数字和量子处理器或计算机及其组合。该装置还可以是或进一步包括专用逻辑电路,例如FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路),或量子模拟器,即设计为模拟或产生关于特定量子系统的信息的量子数据处理装置。特别地,量子模拟器是一种专用量子计算机,它不具有执行通用量子计算的能力。除了硬件之外,该装置可以可选地包括为数字和/或量子计算机程序创建执行环境的代码,例如构成处理器固件、协议栈、数据库管理系统、操作系统或它们中的一个或多个的组的代码。

[0073] 数字计算机程序也可以被称为或被描述为程序、软件、软件应用程序、模块、软件模块、脚本或代码,可以以任何形式的编程语言来编写,包括编译或解释语言或声明性或过程性语言,并且可以以任何形式进行部署,包括作为独立程序或作为模块、组件、子例程或适用于数字计算环境的其它单元。也可以被称为或被描述为程序、软件、软件应用程序、模块、软件模块、脚本或代码的量子计算机程序可以用任何形式的编程语言编写,包括编译或解释语言或者声明性的或过程性的语言,并且翻译成合适的量子编程语言,或者可以用量子编程语言例如QCL或Quipper编写。

[0074] 数字和/或量子计算机程序可以但不一定对应于文件系统中的文件。程序可以存储在保存其它程序或数据的文件的一部分中,例如存储在标记语言文档中的一个或多个脚本,专用于所讨论的程序的单个文件中,或者存储在多个协调文件中,例如,存储一个或多个模块、子程序或代码的部分的文件。数字和/或量子计算机程序可以被部署为在一个数字量子计算机或多个数字和/或量子计算机上执行,这些计算机位于一个地点或分布在多个地点并且通过数字和/或量子数据通信网络相互连接。量子数据通信网络被理解为可以使用量子系统(例如,量子位)传输量子数据的网络。通常,数字数据通信网络不能传输量子数据,然而量子数据通信网络可以传输量子数据和数字数据二者。

[0075] 在本说明书中描述的过程和逻辑流程可以由一个或多个可编程数字和/或量子计算机执行,根据情况与一个或多个数字和/或量子处理器一起操作,执行一个或多个数字和/或量子计算机程序以通过对输入数字和量子数据进行操作并生成输出来执行功能。过程和逻辑流程也可以由专用逻辑电路(例如,FPGA或ASIC)或量子模拟器,或者由专用逻辑电路或量子模拟器与一个或多个编程的数字和/或量子计算机的组合来执行,或者该装置可以实现为专用逻辑电路或量子模拟器或专用逻辑电路或量子模拟器与一个或多个编程的数字和/或量子计算机的组合。

[0076] 对于“被配置为”执行特定操作或动作的一个或多个数字和/或量子计算机的系统意味着系统在其上安装了软件、固件、硬件或它们的组合运行时使系统执行操作或动作。对于要被配置为执行特定操作或动作的一个或多个数字和/或量子计算机程序意味着一个或多个程序包括当由数字和/或量子数据处理装置执行时使装置执行操作或动作。量子计算机可以接收来自数字计算机的指令,该指令在由量子计算装置执行时使装置执行操作或动作。

[0077] 适合于执行数字和/或量子计算机程序的数字和/或量子计算机可以基于通用或专用数字和/或量子微处理器或两者,或者任何其它种类的中央数字和/或量子处理单元。通常,中央数字和/或量子处理单元将接收来自只读存储器或随机存取存储器,或者适合于传输量子数据的量子系统,例如,光子或它们的组合两者的指令和数字和/或量子数据。

[0078] 数字和/或量子计算机的基本元件是用于实施或执行指令的中央处理单元以及用于存储指令和数字和/或量子数据的一个或多个存储器设备。中央处理单元和存储器可以由专用逻辑电路或量子模拟器补充或者并入其中。通常,数字和/或量子计算机还将包括用于存储数字和/或量子数据的一个或多个大容量存储设备,例如磁、磁光盘或光盘,或适于存储量子信息的量子系统,或者可操作地耦合成从一个或多个大容量存储设备或量子系统接收数字和/或量子数据,或者将数字和/或量子数据传输到一个或多个大容量存储设备或量子系统,或二者。然而,数字和/或量子计算机不需要这种设备。

[0079] 适于存储数字和/或量子计算机程序指令以及数字和/或量子数据的数字和/或量子计算机可读介质包括所有形式的非易失性数字和/或量子存储器、介质和存储器设备,包括作为示例,半导体存储设备,例如EPROM、EEPROM和闪存设备;磁盘,例如内部硬盘或可移动磁盘;磁光盘;和CD-ROM和DVD-ROM盘;以及量子系统,例如捕获的原子或电子。应该理解的是,量子存储器是能够以高保真度和高效率长时间存储量子数据的设备,例如其中光用于传输并且物质用于存储和保存量子数据的量子特征(诸如叠加或量子相干性)的光物质接口。

[0080] 本说明书中描述的各种系统或其一部分的控制可以在数字和/或量子计算机程序产品中实现,该数字和/或量子计算机程序产品包括存储在一个或多个非暂态机器可读存储介质上并且可在一个或多个数字和/或量子处理设备执行的指令。在本说明书中描述的系统或其部分可以各自实现为可以包括一个或多个数字和/或量子处理设备和存储器的装置、方法或电子系统,以存储可执行指令来执行在本说明书中描述的操作。

[0081] 虽然本说明书包含许多具体的实现细节,但这些细节不应被解释为对可要求保护的范围的限制,而应被解释为可能特定于特定实施例的特征的描述。本说明书中在单独实施例的上下文中描述的某些特征也可以在单个实施例中组合实现。相反地,在单个实施例的上下文中描述的各种特征也可以在多个实施例中单独地或以任何合适的子组合来实现。此外,尽管上文可以将特征描述为以某些组合起作用并且甚至最初如此主张,但是来自要求保护的组合的一个或多个特征可以在某些情况下从该组合中删除,并且所要求保护的组合可以针对子组合或子组合的变化。

[0082] 类似地,尽管在附图中以特定顺序描绘了操作,但是这不应该被理解为要求以所示出的特定次序或按顺序次序执行这种操作,或者要执行所有示出的操作以实现期望的结果。在某些情况下,多任务和并行处理可能是有利的。此外,上述实施例中的各种系统模块和组件的分离不应该被理解为在所有实施例中都需要这种分离,并且应该理解,所描述的程序组件和系统通常可以一起集成在单个软件产品中,或者打包成多个软件产品。

[0083] 已经描述了主题的特定实施例。其它实施例在以下权利要求的范围内。例如,权利要求中列举的动作可以以不同的次序执行并仍然实现期望的结果。作为一个示例,附图中描绘的过程不一定需要所示的特定次序或顺序次序,以实现期望的结果。在一些情况下,多任务和并行处理可能是有利的。

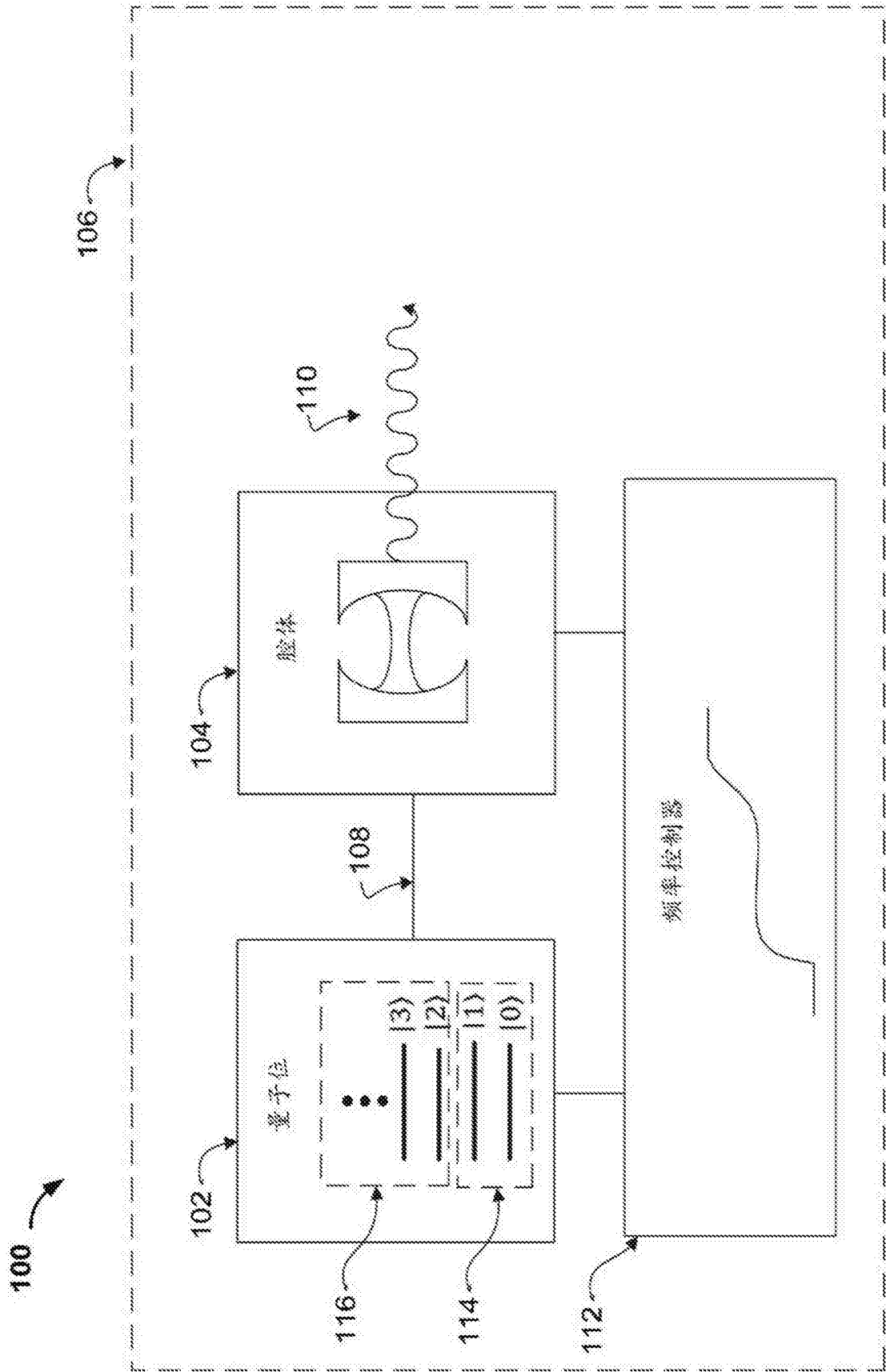


图1

200 ↘

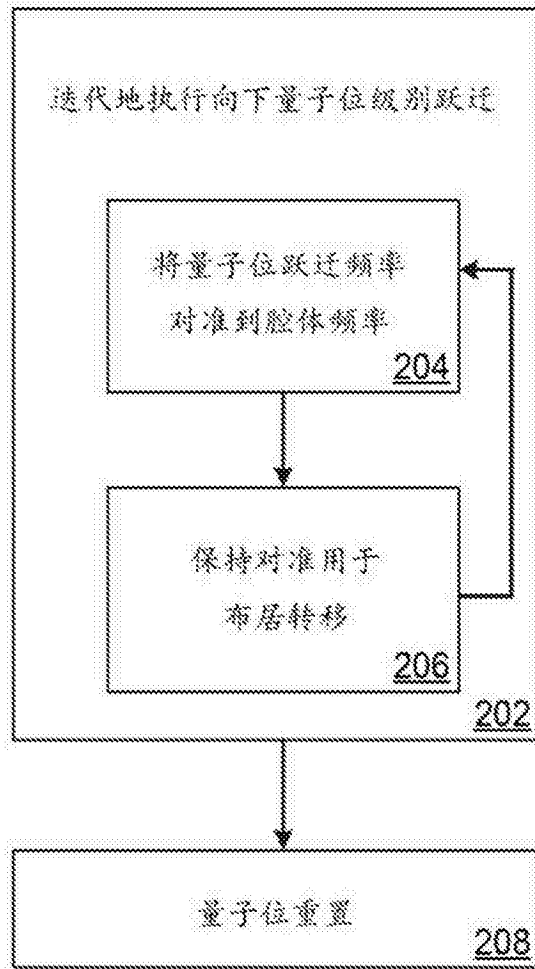


图2

300 ↘

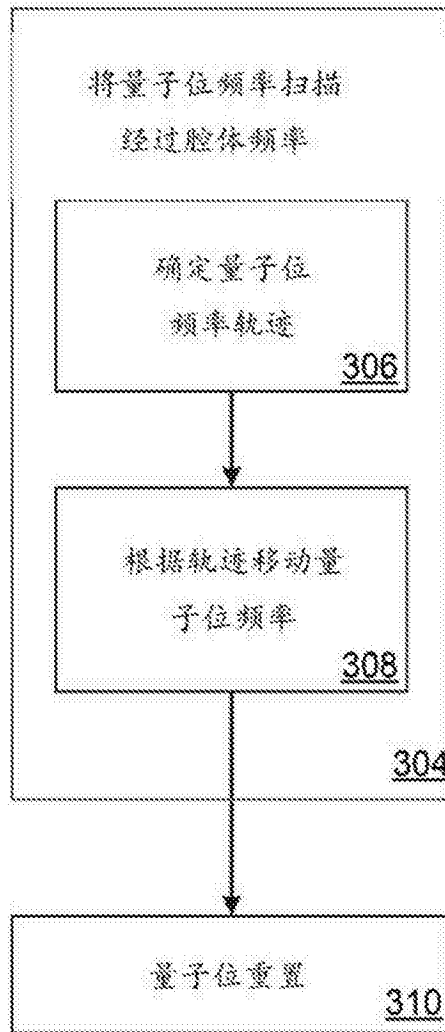


图3

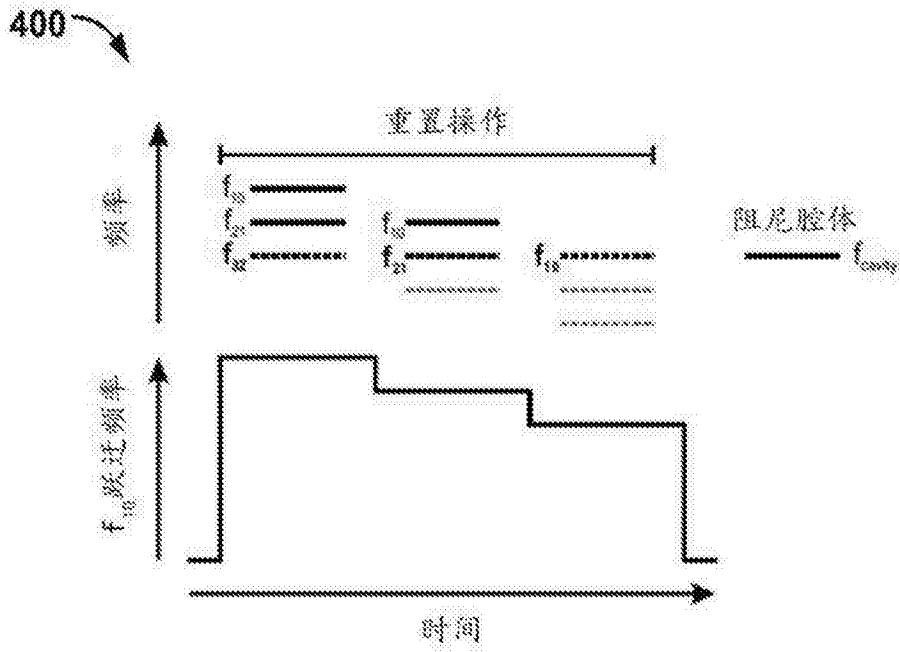


图4

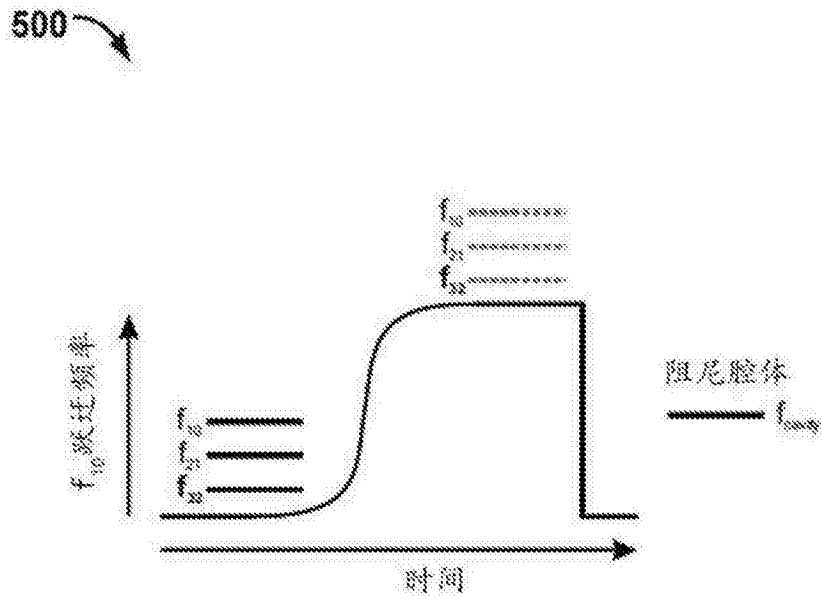


图5

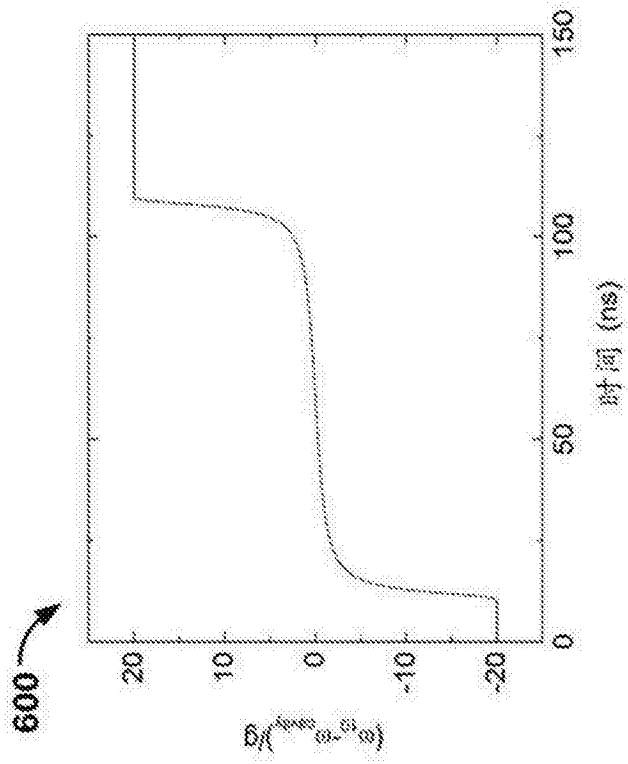


图6A

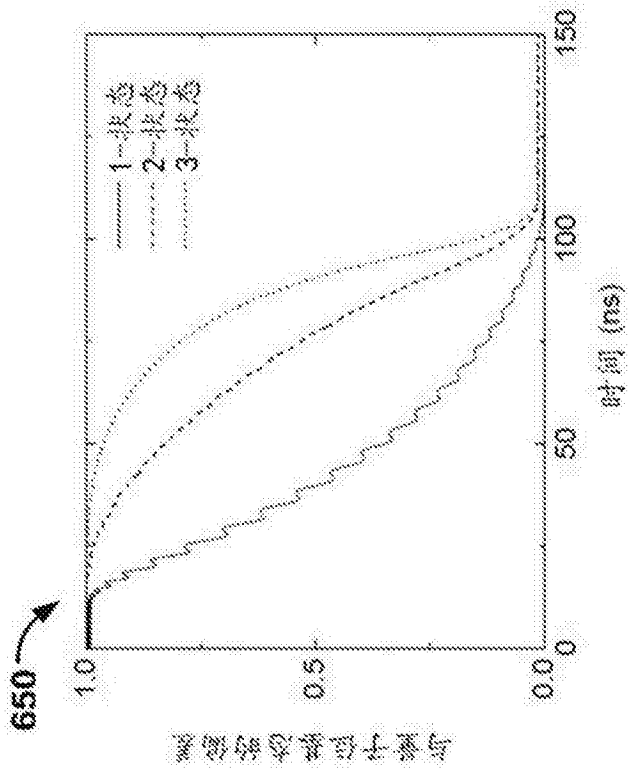


图6B