



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103582949 A

(43) 申请公布日 2014. 02. 12

(21) 申请号 201280026434. 8

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2012. 05. 04

H01L 29/06 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/497, 018 2011. 06. 14 US

13/224, 768 2011. 09. 02 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 11. 29

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/036442 2012. 05. 04

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/173712 EN 2012. 12. 20

(71) 申请人 国际商业机器公司

地址 美国纽约阿芒克

(72) 发明人 J·M·甘贝塔 M·B·凯琴

C·T·里格蒂 M·斯蒂芬

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所

11256

代理人 鄢迅 陈颖

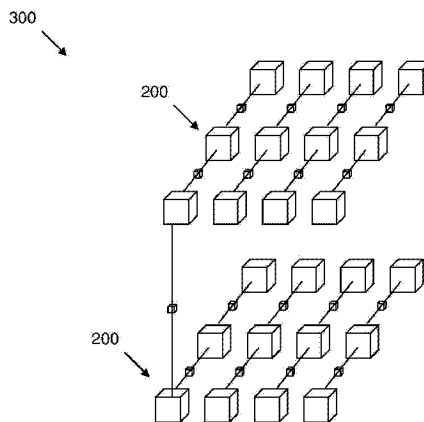
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

用于量子信息处理的固定耦合量子系统的模块化阵列

(57) 摘要

一种量子信息处理系统包括第一复合量子系统、第二复合量子系统、耦合到该系统的多个电磁场源以及在第一复合量子系统和第二复合量子系统之间的可调节的电磁耦合。



1. 一种量子信息处理系统,包括:  
第一复合量子系统;  
第二复合量子系统;  
耦合到所述系统的多个电磁场源;以及  
在所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统之间的可调节的电磁耦合。
2. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统各自包括:  
限定其中的腔体的壳体;  
布设在所述腔体中的多个量子系统;以及  
耦合到所述腔体的电磁场源。
3. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述复合量子系统中的每一个耦合到来自所述多个电磁场源的电磁场源。
4. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述电磁场源被配置成产生所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统的量子态的变换。
5. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述电磁场源被配置成抑制所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统的量子态的变换。
6. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述电磁场源被配置成产生所述复合量子系统的一部分或全部的投影量子测量。
7. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统中的每一个包括指示所述复合量子系统的量子态的一个或多个可测量属性。
8. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统中的每一个耦合到下述装置;所述装置用于促进对指示所述复合量子系统的量子态的复合量子系统的属性的测量。
9. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述系统的演进和测量实现并且执行量子信息处理算法、任务和协议中的至少一个。
10. 根据权利要求1所述的系统,进一步包括电子电路,所述电子电路布设在所述第一复合量子系统和所述第二复合量子系统之间,由此将所述第一系统电磁耦合到所述第二系统。
11. 根据权利要求1所述的系统,进一步包括耦合到所述可调节电磁耦合的电磁场源。
12. 根据权利要求3所述的系统,其中,所述第一复合量子系统包括第一多个量子位,并且所述第二复合量子系统包括第二多个量子位。
13. 根据权利要求12所述的系统,其中,所述第一个多个量子位被布置在所述第一量子位阵列中,使得与所述第一多个量子位中的每一个相关联的模式彼此耦合,并且其中,所述第二多个量子位被布置在所述第二量子位阵列中,使得与所述第二多个量子位中的每一个相关联的模式彼此耦合。
14. 根据权利要求12所述的系统,其中,所述电磁场源被配置成生成所述多个量子位中的每一个的一个或多个量子态。
15. 一种模块化计算系统,包括:  
第一量子位集群;

第二量子位集群 ; 以及

布设在所述第一量子位集群和所述第二量子位集群之间并且耦合所述第一量子位集群和所述第二量子位集群的可调谐耦合器。

16. 一种量子计算系统, 包括:

具有第一交互强度的第一量子位集群;

具有第二交互强度的第二量子位集群; 以及

布设在所述第一量子位集群和所述第二量子位集群之间并且配置成调谐所述第一交互强度和所述第二交互强度的子电路。

17. 一种量子计算方法, 包括:

对布置在波导腔体中的多个量子位施加电磁场;

调节所述电磁场以生成所述多个量子位中的每一个中的量子态; 以及

调节所述电磁场以使所述多个量子位中的每个量子位彼此耦合。

18. 根据权利要求 17 所述的方法, 进一步包括: 测量所述多个量子位中的每个量子位的所述量子态。

19. 一种量子计算方法, 包括:

在具有第一多个量子位的第一壳体中生成第一电磁场;

在具有第二多个量子位的第二壳体中生成第二电磁场; 以及

在所述第一壳体和所述第二壳体之间生成第三电磁场, 以将所述第一多个量子位耦合到所述第二多个量子位。

20. 根据权利要求 19 所述的方法, 进一步包括:

调节所述第一电磁场, 以生成所述第一多个量子位中的每个量子位中的量子通量; 以及

测量所述第一多个量子位的每个量子位的所述量子通量。

21. 根据权利要求 20 所述的方法, 进一步包括:

调节所述第二电磁场, 以生成所述第二多个量子位中的每个量子位中的量子通量; 以及

测量所述第二多个量子位的每个量子位的所述量子通量。

22. 根据权利要求 19 所述的方法, 进一步包括: 调谐所述第三电磁场, 以调节在所述第一多个量子位和所述第二多个量子位之间的耦合。

23. 根据权利要求 22 所述的方法, 进一步包括:

调节所述第一电磁场以调节所述第一多个量子位中的每个量子位之间的耦合。

24. 根据权利要求 21 所述的方法, 进一步包括:

调节所述第二电磁场以调节所述第二多个量子位中的每个量子位之间的耦合。

## 用于量子信息处理的固定耦合量子系统的模块化阵列

### [0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 要求基于 2011 年 6 月 14 日提交的名称为“ARRAY OF THREE DIMENSIONAL SUPERCONDUCTING QUBIT/CAVITY CLUSTERS FOR QUANTUM COMPUTING”的第 61/497,018 号美国临时专利申请的优先权,其公开内容通过引用整体合并于此。本申请涉及  $\times\times/\times\times/\times\times$  提交的名称为“ARRAY OF QUANTUM SYSTEMS IN A CAVITY FOR QUANTUM COMPUTING”的共同待决美国专利申请(代理人案号 YOR920110314US2) 并且给予序列号  $\times\times/\times\times, \times\times\times$  的优先权,其全部公开内容通过引用合并于此。

### 背景技术

[0003] 本发明涉及量子信息处理,并且更具体地,涉及对于基于量子系统的阵列集群的量子信息处理硬件的模块化设计。

[0004] 量子信息处理是信息处理的新里程,其中信息由遵照量子力学而不是经典力学定律的系统来存储和处理。这样的计算机在理论上已经被证明能够使用比经典计算机成倍减少的计算源(例如,操作、存储器元件)来解决重要的问题。这样,量子物理提供了用于实现解决目前的及其计算难以进行的特定类问题的计算能力的基础。

[0005] 与经典比特相似,量子位的基本单位被称为量子比特(quantum bit)或量子位(qubit)。为了实现量子信息处理任务,必须开发并且实现多个量子位的物理实例。这些物理实例也被称为量子比特或量子位。因此,关于实现存储在其中的量子信息的实例和单位的物理系统来使用术语“量子位”。

[0006] 实现量子位的实例的物理量子力学系统必须具有至少两个不同的并且可区分的本征态,以便于表示至少两个逻辑状态。还可以使用不同并且可区分的本征态大于 2 的实例。这些额外的本征态可以被显示地用于表示额外的逻辑状态,或者用于信息处理任务。具体地,可以利用额外的本征态来促进对两个逻辑状态进行编码的两个本征态的测量;或者促进与对两个逻辑状态进行编码的两个本征态相关联的希尔伯特空间(Hilbert space)的变换。

[0007] 若干物理系统和物理领域已经作为用于量子信息处理的可能的框架和开发基础而提出。这些包括但不限于:固态核自旋、被测和受控电子或核磁共振、捕获离子、光学共振腔中的原子(腔量子电动力学)、液态核自旋、量子点中的自由电子的电子电荷或自旋度、基于氦上的电子和约瑟夫逊结的超导量子电路。

[0008] 目前,对量子计算的研究的最活跃的领域是超导量子位、捕获离子、捕获原子和量子点。目前在这些系统中的任何一个中所构建的最大的量子计算机由大约 10-16 个量子位组成,并且大多数实现集中于特定量子算法或量子态的实证。

[0009] 用于构建大规模量子计算的需要比诸如仅仅叠加和纠缠的量子物理性质更加复杂。为了构建实际的量子计算机,存在必须满足的一组要求。一个要求是拥有可以被初始化到已知状态的量子位的系统。另一要求是通过单个和多个量子位门运算来操纵该状态、从而可以实现任何任意的逻辑运算的能力。最后,必须通过已知的技术来测量计算的结果。

此外,为了使量子系统保持精确创建的叠加和纠缠状态达充分长的时间(即,相干时间),其必须与环境隔离。然而,为了根据期望的算法的步骤来操纵量子系统,其还必须固在地耦合到外部环境,由此引入降低相干时间的噪声机制。

### 发明内容

[0010] 示例性实施例包括一种量子信息处理系统,该量子信息处理系统包括第一复合量子系统、第二复合量子系统、耦合到该系统的多个电磁场源以及在第一复合量子系统和第二复合量子系统之间的可调节的电磁耦合。

[0011] 其他示例性实施例包括一种模块化计算系统,包括第一量子位集群、第二量子位集群以及可调谐耦合器,该可调谐耦合器被布设在第一量子位集群和第二量子位集群之间并且耦合第一量子位集群和第二量子位集群。

[0012] 其他示例性实施例包括一种量子计算系统,该量子计算系统包括具有第一交互强度的第一量子位集群、具有第二角度强度的第二量子位集群以及子电路,该子电路布设在第一量子位集群和第二量子位集群之间的,并且配置成对第一交互强度和第二交互强度进行调谐。

[0013] 其他示例性实施例包括一种量子计算方法,包括:对布置在波导腔体或任何适当的量子总线中的多个量子位施加电磁场、调节电磁场以生成多个量子位中的每个量子位中量子态,以及调节电磁场以使多个量子位中的每个量子位彼此耦合。

[0014] 其他示例性实施例包括一种量子计算方法,包括:在具有第一多个量子位的第一壳体中生成第一电磁场、在具有第二多个量子位的第二壳体中生成第二电磁场,以及在第一壳体和第二壳体之间生成第三电磁场以将第一多个量子位耦合到第二多个量子位。

[0015] 通过本发明的技术来实现其他特征和优点。本发明的其他实施例和方面在这里详细描述并且被视作要求保护的发明的一部分。为了通过更好地理解具有该优点和特征的本发明,参考说明书和附图。

### 附图说明

[0016] 关于本发明的主题在说明书的结论处的权利要求书中被具体地指出并且明确地要求保护。从结合附图作出的下面的具体实施例方式中,本发明的前述和其他特征及优点是显而易见的,在附图中:

[0017] 图 1 图示了示例性三维量子位集群装置的示例;

[0018] 图 2 图示了多个三维量子位集群装置的示例性二维点阵多量子位系统;

[0019] 图 3 图示了多个三维量子位集群装置的示例性三维点阵多量子位系统;以及

[0020] 图 4 图示了根据示例性实施例的用于量子计算方法的方法的流程图。

### 具体实施方式

[0021] 这里描述的系统和方法以模块系统实现耦合的量子位的大的集合(例如,在千位级或更大),该模块系统可以被修改、测试、特征化、评价和操作为较小的系统。为此,每个较小的子系统可以与系统的其他部件集中并且隔离。在不影响构成整个系统的子系统的优势的性能的情况下,其他子系统可以被添加到整个系统或者从整个系统中移除。这里描述的

系统和方法是用于模块量子计算机的构成、组装、测试、特征化、评估和操作的框架。

[0022] 在示例性实施例中,这里描述的系统和方法涉及用于量子信息处理系统的模块设计,其中量子位的物理实例被布置成两级物理组织和结构。该两级被称为“集群”和“阵列”。

[0023] 结构的第一级是“集群”。在示例性实施例中,量子位被分组成大约 1 到 20 个量子位的小集群。集群中的每个量子位被电磁地或耦合到集群中的至少一个其他量子位。该耦合通过嵌入在集群的壳体中、在集群的壳体附近或者用作集群的壳体的物理或电磁结构或机制来进行。以该方式,每个集群附加由在包括该集群的量子位对之间的量子位 - 量子位交互。因此,每个集群形成复合量子系统。

[0024] 在示例性实施例中,这里描述的系统和方法实现可调谐和可调节的元件:介于集群内量子位 - 量子位耦合的结构被称为固定在通过集群内的量子位的相干生命周期所设置的时间标度上。因为调谐度要求对外部场源集群的耦合,所以计算期间仅适用固定的集群内耦合允许仅通过对外部电磁环境的最小连接来构建和操作量子位集群。

[0025] 以该方式,每个集群主要与电磁环境并且所有其他的集群电磁隔离,除非出于包括集群之间的感生交互的目的或者除了出于控制、测量或执行构成为形成量子信息处理任务的构成过程而经由外部源施加电磁场。因此每个集群可以被视作独立的复合量子系统。

[0026] 在示例性实施例中,结构的第二级是“阵列”。如上所述的多个集群被布置和连接为形成集群阵列。每个集群在集群中的量子位的物理实例方面与每个集群彼此类似。然而,不同的集群可以具有不同数目的量子位(尽管总是处于上述范围中),并且具有些许不同或者由此到彼的变化的属性。

[0027] 阵列中的每个集群通过物理或电磁结构或者以下述方式可调谐或可调节的机制而耦合到至少一个其他集群,该方式比在两个连接的集群中的量子位的典型相关生命周期更快地在时间标(time scale)方面改变在一个集群中的量子位和邻居集群中的量子位之间的交互强度。

[0028] 因为阵列中的每个集群与该阵列中的其他集群彼此实质上类似,所以该阵列中的集群对之间的每个连接与该阵列中的其他对之间的其他连接彼此实质上类似。

[0029] 当控制两个集群之间的交互的机制被设置为关闭位置时,第一集群中的量子位中的每一个与第二集群中的量子位之间的交互的强度比在两个连接的集群中的量子位的相干生命周期所特有的时间标更弱。以该方式,相邻集群之间的交互使得当交互被设置为关闭位置时,每个集群形成保持与阵列中的其他集群形成的复合量子系统独立和分离的复合量子系统。可以独立于每个其他集群来表征、测试、优化和操作每个集群。以该方式,这里描述的示例性实施例实现模块量子化信息处理系统。

[0030] 在示例性实施例中,这里描述的系统和方法实现包括经典可模拟数目的量子级的量子位集群。多个集群可以被耦合在一起以生成可以用于较大量子计算应用的集群阵列。如这里进一步所述,阵列包括多个集群以及使每个集群与其他集群连接并且使每个集群与其所连接到的其他集群(即,阵列中的邻居集群)断开的机制(即,可调谐耦合器)。出于调节、测试、表征、评估和操作的目的是,阵列中的集群中的每一个可以与所有其他的集群隔离。因此,每个阵列包括经典可模拟(即,能够在现代经典计算机上模拟)的子系统,连接到具有有效地允许每个子系统与阵列中的所有其他的子系统隔离的可调谐耦合器的另一个连接。这样,基于其他子系统对阵列的添加或连接来构建和操作量子计算机。这里描述的系统

方法还表征、评估和验证符合对大的量子系统的模拟的经典计算限制的量子计算机片段的性能。因此,这里描述的阵列是包括连接到电磁或机械控件的可调谐耦合器和耦合到电磁场源的量子位的集群的模块化物理系统。量子位的集群各自具有通过调谐集群之间的交互强度的子电路(例如,可调谐耦合器)而彼此耦合的固定交互强度。

[0031] 在示例性实施例中,量子信息处理系统可以包括第一复合量子系统(例如,第一量子位集群)、第二复合量子系统(例如,第二量子位集群)、耦合到系统的电磁场源以及在第一复合量子系统和第二复合量子系统之间的可调节电磁耦合。复合量子系统可以各自包括限定腔体的壳体、布设在腔体中的量子系统以及耦合到腔体的电磁场源。复合量子系统中的每一个从电磁场源耦合到电磁场源。此外,电磁场源被配置为产生第一复合量子系统和第二复合量子系统的量子态的变换或抑制变换。电磁场源还被配置为产生复合量子系统的一部分或全部的投影量子测量。在示例性实施例中,第一复合量子系统和第二复合量子系统中的每一个包括指示复合量子系统的量子态的一个或多个可测量属性。此外,第一复合量子系统和第二复合量子系统中的每一个耦合到用于促进指示复合量子系统的量子态的复合量子系统的属性的测量的装置。此外,系统的演进和测量实施并且执行量子信息处理算法、任务和协议中的至少一个。在示例性实施例中,该系统可以包括布设在第一复合量子系统和第二复合量子系统之间的电子电路,由此将第一系统电磁耦合到第二系统。此外,第一复合量子系统和第二复合量子系统可以是量子位的集群,并且电磁场源被配置为生成量子位的集群中的一个或多个量子态。

[0032] 图 1 图示了示例性量子位集群装置 100 的示例。装置 100 包括其中限定了腔体 110 的壳体 105。装置 100 可以进一步包括布设在腔体 110 内的量子位 115 的集群。如本文所述,超导约瑟夫逊结的示例被描述为量子位 115 中的每一个。然而,如本文所述,应当认识到,可以实现任何类型的量子位,包括但不限于量子点、电子或核自旋或其组合。装置 100 可以进一步包括外部电磁源 120 (例如,同轴电缆),该外部电磁源 120 耦合到壳体 105 并且提供腔体 110 内的电磁场。这样,可以理解,壳体 105 是用于施加到壳体 105 的电磁场的电磁波导。量子位 115 可以以各种方式被布置在腔体 110 内。腔体内的量子位的位置和方向可以影响其耦合到腔体模式的强度。每个量子位 115 可以被看作是具有关联的偶极矩的矢量的偶极子。其与腔体 110 的交互的强度主要通过偶极矩矢量与量子位 115 的位置处的电场矢量的点积来确定。这样,因为量子位通过其与腔体模式的相互交互来获得直接量子位 - 量子位的有效交互,所以关于感兴趣的模式的电场简档的量子位的位置和方向的调节可以用于调节量子位 - 腔体耦合的强度,并且进而量子位 - 量子位耦合的强度。装置 100 是包括多个量子位 115 的扩展的(scaled)装置。这样,腔体 110 可以支持高容量的电磁模式、在腔体 110 和量子位之间具有强耦合。此外,在可以通过来自电磁源 120 的电磁场来控制 and 调谐的腔体内的各个量子位 115 之间存在强耦合。因此,装置 100 从单个 3D 量子位缩放为用于量子计算的耦合的 3D 量子位的大平台。在示例性实施例中,缩放过程是模块化的。图 1 图示了如所述的单个量子位集群 100。在示例性实施例中,图示了 8 个量子位 115,并且可以以各种方式布置为实现期望的量子位之间的耦合。将认识到,存在量子位 115 可以以其进行耦合的很多方法和方式。量子位 115 中被图示为八角形图案,但是并不以任何方式将其他示例性实施例限制为该图案。此外,可以有比 8 更少或更多的量子位 115 布置在腔体 110 中。如这里进一步描述的,图示了 8 个量子位 115 是因为其表现为类似于传统

NMR 分子, 并且因此很好理解和进行表征。

[0033] 这样, 图 1 图示了用于形成量子位集群装置 100 的腔体 115 内部的超导量子位(例如, 8 个气窗式量子位), 如述为超高 Q 超导波导谐振器。在进一步缩放中, 额外的量子位集群装置可以耦合到如现在描述的量子位集群装置 100。

[0034] 图 2 图示了多个 3D 量子位集群装置 A1、A2、B1、B2 的示例性二维晶格多量子位系统 200。装置 A1、A2、B1、B2 仅是说明性的, 并且可以缩放到较大数目的量子位集群装置, 诸如在 A1-An、B1-Bm 级的多个行和列, 其中 n 和 m 是整数。此外, 装置 A1、A2、B1、B2 中的每一个包括与图 3 的装置 300 的类似结构。例如, 该装置 A1 包括在其中限定了腔体 210 的壳体 205。装置 A1 可以进一步包括布设在腔体 210 内的量子位 215 的集群。装置 A1 可以进一步包括耦合到壳体 205 并且在腔体 210 内提供电磁场的外部电磁源 220 (例如, 同轴电缆)。系统 200 进一步包括经由耦合元件 251 (例如, 传输线) 耦合在相邻装置 A1、A2、B1、B2 之间的电磁谐振器 250, 该耦合元件 251 将腔体 210 耦合到电磁谐振器 250。调谐器 250 经由适当地耦合设备耦合到各个装置 A1、A2、B1、B2, 适当地耦合设备诸如但不限于, 根据在耦合中实现的谐振器的类型的传输线和波导。例如, 谐振器 250 可以从任何集总元件(明显的电容器和电感器) 或者从传输线的短部构建的微波谐振器。传输线可以是同轴的平面波导等。这些谐振器是通过在其中并入一些非线性材料或电路元件而可调谐的。非线性电路元件的示例可以是约瑟夫逊结, 其可以作为可调谐电感器。一种可能的设计是由从具有嵌入在中心导体或在中心导体和地平面的间隙中的约瑟夫逊结的共面波导的短截面制成的传输线谐振器。另一谐振器可以包括由一个或多个约瑟夫逊结介入的超导回路, 其用作取决于磁场的电感。无论实现的谐振器的类型如何, 谐振器 250 是可调谐的, 使得相邻的装置 A1、A2、B1、B2 彼此耦合。通过调谐各的电磁场, 一个装置 A1、A2、B1、B2 中的量子位的组可以耦合到另一装置 A1、A2、B1、B2 中的相邻的量子位的组。这样, 不仅量子位耦合到其相应的腔体和驻留在其腔体中的其他量子位, 也在整个系统 200 中还可以耦合量子位的组, 如本文中进一步描述。

[0035] 系统 200 能够使用完整的多量子位系统 200 来进行非本地纠缠、传送和纠错。在缩放时, 关于缩放的其他问题可以被解决, 诸如但不限于热化、物理组件和信号递送(例如, I/O 问题)。可以理解, 来自图 2 的 3D 量子位装置 200 的缩放使用在前两个级中开发的系统的标称相同的副本来调节为图 3 的量子位集群装置 300 以及这些单元晶格(unit cell)的二位阵列, 如在图 2 (b)中所示。最后, 多个二维阵列可以被垂直堆叠为形成三维阵列。图 3 图示了如这里所述的多个 3D 量子位集群装置的示例性 3D 晶格多量子位系统 300。为了说明的目的, 示出了图 2 的两个系统 200。图 3 被图示为进一步示出本文所描述的系统和方法的缩放。可以理解, 可以对系统 300 添加额外的系统 200, 以进一步缩放量子计算机的尺寸。

[0036] 在示例性实施例中, 如本文所述, 集群内的量子位的耦合以及集群之间的各个量子位的耦合可以通过电磁场的应用来实现。随后, 可以进行量子位的测量以确定量子位的量子态。电磁场以及随后的量子态测量的应用描述了整体量子计算方法。图 4 示出了根据示例性实施例的量子计算方法的方法 400 的流程图。在框 410 中, 可以向第一量子位集群施加并调节第一电磁场(例如图 2 中的装置 A1)。在框 420, 可以向第二量子位集群施加并调节第二电磁场(诸如图 2 的装置 A2)。如本文所述, 对各个量子位集群的电磁场的应用将



集群内的量子位彼此耦合并且感生量子态。在框 430,可以在第一和第二量子位集群之间施加并调节第三磁场(诸如施加来自布设在装置 A1、A2 之间的谐振器 250 的谐振频率)。例如,第三场被施加到电磁谐振器 250 以及装置 A1 和 A2。如本文所述,第三磁场的应用将第一量子位集群内的各个量子位与第二量子位集群中的各个量子位耦合,从而耦合量子位集群。在每次迭代以执行特定的量子算法或纠错方案(框 450)期间,重复和修改框 410、420 和 430。在框 440 处,可以例如通过测量各个量子位的量子通量来进行对量子位的量子态的适当测量。

[0037] 现在进一步描述示例性系统和方法的若干性质。如本文所述,很好理解的是,具有分散耦合到单个玻色子谐振器模式的多个气窗式量子位的系统的物理系(例如,NMRQC)。在示例性实施例中,利用固定的量子位频率和固定的量子位-量子位的耦合来实现本文所描述的系统和方法。以这种方式,可以实现已知的 NMR 控制技术。在 NMR 技术中,实现拉莫尔频率,其中量子位往往与所施加的电磁场对准。此外,在本文描述的示例性量子位集群中,描述在分子中的电子环境上的能量水平的依赖关系的化学位移可以被实现为确定在给定的腔体中的能量水平的依赖关系。通过实施这样的公知的技术,可以实现这里所描述的示例性的量子位集群的通用控制。在示例性实施例中,量子位频率可以经由引入到腔体的电线来进行控制。通过量子位频率和非谐性的适宜选择,可以实现等于 NMR 中的汉密尔顿函数的汉密尔顿函数,其中存在可比较强度的长期和非长期的耦合项,但是仅长期的部分是重要的,因为它进入一阶摄动理论。在示例性实施例中,可以在腔体内的单个量子位上选择自旋。

[0038] 在 NMRQC 中,ZZ 交换和交互描述了相邻分子之间的自旋交换。该概念可以被延伸为描述如在示例性实施例中描述的量子位中的自旋交换。当在特定腔体中的量子位之间的有效 ZZ 交互与非对角(off-diagonal) J-耦合项相比明显时,即交互量子位的角动量的耦合,NMR 型汉密尔顿函数出现。该 ZZ 交互具有两个物理源点。首先,当腔体量子位耦合被处理为四阶摄动理论处理时,ZZ 交互在两级逼近中出现。第二,其在计算子空间外的额外的量子位水平被适当建模时出现。可以使得两个效果相加而不是抵消。在示例性实施例中,本文所描述的包括实现 NMR 型汉密尔顿函数的电路的系统和方法需要理解和利用 ZZ 交互项的两个源点。随着集群中的一个量子位的 1→2 跃进接近另一的 0→1 跃进,该效果的强度迅速增加。通过利用这些物理现象,可以如所述的对这里描述的量子位集群进行缩放。

[0039] 在示例性实施例中,为了产生由如下表征的 NMR 型汉密尔顿函数:1) 固定的量子位跃迁频率以及 b) 由 ZZ 交互支配的固定的量子位-量子位耦合,本文所述的系统具有下述特性:1) 以表现为有效的两级系统的方式来控制和操纵每个量子位;2) 每个量子位利用远大于量子位的弛豫(qubit relaxation)和退相干速率的耦合能量来与至少一个其他量子位交互;3) 该系统允许对量子位应用频率和幅度调制的微波控制场;以及 4) 该系统允许可以读出所有量子位的量子态。

[0040] 在示例性实施例中,两个量子位门通过什么都不做而被执行为要纠结的两个量子位,而所有其他对之间的交互重新集中。在对多自旋分子的最近的液态 NMR 实验中,已经证明了  $E_{1q}=1.3 \times 10^{-4}$  和  $E_{2q}=4.7 \times 10^{-3}$  的非常高保真度的控制。认为这些由于开始难以极化自旋而受到限制。相反,在示例性实施例中,可以容易地初始化这里描述的量子位(即,超导量子位)。然而,较高的拉莫尔频率(与 50-500MHz 相比,大约 1-10GHz),进行额外的步骤以做

出准确的数值脉冲优化。

[0041] 在示例性实施例中,此处所描述的示例性集群内的量子位通过对容纳其的腔体的谐振或近谐振的信号施加来进行测量。可以根据联合分散读出的建立的方法来进行读出。还通过对相邻耦合元素施加驱动信号来实现单发读出,其非线性使其适合于信号放大。

[0042] 这样,可以理解,这里所描述的示例性集群合并了诸如超导属性的量子位的 NMRQC 和期望属性的已知和被良好表征的特征。

[0043] 如本文中进一步描述,为了使如图 3 中所示的量子位集群扩展到例如如图 2 和图 3 所示的所描述的较大的阵列,添加其他集群。如图 2 和图 3 中描述的示例性系统 200、300,高 Q 值可调谐谐振器(例如,谐振器 250)调解独立集群中的“相同”量子位之间的交互。例如,在图 2 中,一些量子位 215 被标记有 Q1。装置 A1、A2 之间的谐振器 250 可以被调谐为对频率  $f_{q1}$  的与一对量子位(例如,量子位 A1Q1、A2Q1)的谐振。该频率  $f_{q1}$  的施加导致了装置 A1、A2 之间的从量子位 A1Q1 和 A2Q1 到耦合谐振器 250 的量子信息的增强交换。实现了量子位交换速率对谐振器 250 的谐振增强而不是实现对量子位弛豫的抑制。量子位 A1Q1、A2Q2 中的每一个根据下述表达式来与谐振器进行交互： $H_{eff} \cong g_c g_q (\sigma_q^- c^r + \sigma_q^+ c) / \Delta_q$

[0044] 其中,  $g_c$  是谐振器 250 和 cQED 集群腔体(即装置 A1、A2 的腔体 210 中的任何一个)之间的耦合强度,  $g_q$  和中  $\Delta_q$  分别是量子位 215 的集群内的标准 cQED 量子-腔体耦合强度和失调,  $\sigma_q$  是量子位运算和谐振器 250 运算子。当装置 A1、A2 以及谐振器 250 谐振时,量子位-量子位以该速率的一半前进或  $g_c g_q / 2 \Delta_q$ 。通过当前支配的可调谐腔体性能,在单独腔体中的量子位之间的该耦合方案可以产生具有  $10^{-2}$  的门运算错误率的运算,并且随着可调谐谐振器 250 的 Q 中的任何改进而线性增加。理论上可以使门错误率高达 5 至 10 倍。

[0045] 在示例性实施例中,当谐振器 250 失调时,其余耦合仅通过相应的装置 A1、A2 和谐振器 250 中的每一个经由三阶色散耦合进行作用,效果与下述等式成比例:

$$H_{eff}^{off} \cong g_c^2 g_q^2 (\sigma_a^- \sigma_b^+ + \sigma_a^+ \sigma_b^-) / \Delta_q^2 \Delta_c^{off}$$

[0046] 该可调谐耦合的开/关比率由此是： $H_{eff}^{off} \cong \Delta_q \Delta_c^{off} / g_c g_q$

[0047] 这是可访问参数的 100-1000。

[0048] 如本文所述,许多不同类型的谐振器可以被实现为谐振器 250。例如,用于中介相邻集群(例如,装置 A1、A2)的量子位之间的交互的基本可调谐耦合元件可以包括嵌入在 2D 或 3D 的谐振器结构和施加偏置场的模式体积内的约瑟夫逊结。该可调谐耦合器可能是无源但是可调谐的设备,诸如频率调谐的谐振器;或者可以是有源设备如,约瑟夫逊参数转换器,其频率随着取决于泵功率的增益而转换。目前可用的技术已经实现了具有  $Q_{\text{tunable}} = 3 \times 10^4$  的可调谐谐振器。无损约瑟夫逊频率转换器还可以被实现为谐振器 250。无损约瑟夫逊频率转换器可以用作具有取决于所施加的泵功率的增益的频率转换器,并且因此能够产生具有较大开/关比率的非常强的集群-集群耦合。无损约瑟夫逊频率转换器还可以被实现为能够进行单词投影联合读出、用于量子纠错方案的有价值的源的读出元件。

[0049] 在示例性实施例中,缩放可以不仅进一步包括如上所述的相邻装置 A1、A2,还可以包括包含图 2 中所示的装置 B1、B2 的全 2D 布置。在示例性实施例中,集群的  $2 \times 2$  阵列(例如,装置 A1、A2、B1、B2)可以被实现用于通过经由中间谐振器 250 来耦合最近的邻居的量子

计算。类似地,任何  $3 \times 3$  阵列或更大以及在图 3 中所示的任何 3D 阵列可以进一步被开发实现谐振器 250 以耦合最近的邻居。在这些示例中, $2 \times 2$  阵列可以包括 32 个量子位, $3 \times 3$  阵列可以包括 72 个量子位, $8 \times 8$  阵列可以包括 512 个量子位等,从而证明了量子计算的能力。该缩放方法有利地包括模块化重复单元,该模块化重复单元利用如上所述的已知和支配的物理效果,并且降低了 I/O 挑战,因为例如每个量子位集群可以实现一个控制线。

[0050] 图 1-3 所示的示例示出了量子位的示例性布置。可以理解,量子位集群可以被布置在其他晶格结构中,诸如三角晶格、六角晶格等。还可以被扩展到三维晶格(例如图 3 的立方晶格)。不论量子位集群被布置在 1D、2D 还是 3D 晶格中,为了有助于 I/O 问题或出于其他原因,物理结构都可以被布置为占据了 3D 体积。在图 3 的 3D 立方晶格的情况下,二维正方晶格片可以以若干方法中的任何一个通过额外的可调谐谐振器来彼此连接,例如如在拓扑上形成大的扩展的二维阵列或真正三维阵列,其中每个内部量子位集群连接到其最近的 6 邻居,在同一平面上的 4 个以及每一个正上方和下方。

[0051] 技术效果包括实现布置为耦合用于量子计算的各个量子位的量子位的集群。

[0052] 这里使用的术语仅用于描述特定实施例,而不是意在限制本发明。如本文所用的,单数形式“一”和“所述”旨在还包括复数形式,除非上下文清楚地另有指示。将进一步理解,术语“包括”在本说明书中进行使用时,指定所述的特征、整数、步骤、操作、元件和 / 或组件的存在,但不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件组件和 / 或其组合。

[0053] 相应的结构、材料、动作和所有装置或步骤加在下面的权利要求中的功能元件的等价物意在包括任何结构、材料或用于结合具体要求保护的其他要求保护的元件来执行功能。出于说明和描述的目的,已经提出了本发明的描述,但并非旨在穷举或将本发明限制为所公开的形式。在不脱离本发明的范围和精神的情况下,许多修改和变化对于本技术领域的普通技术人员来说是显而易见。实施例被选择和描述为最好地解释本发明的原理和实际应用,并使其他本技术领域的普通技术人员能够理解适用于预期的具体使用的各种修改的各种实施例的发明。

[0054] 这里描绘的流程图仅仅是一个示例。在不脱离本发明精神的情况下,可能存在对附图或这里描述的步骤(或操作)的许多变化。例如,步骤可以以不同的顺序被执行,或者步骤可以被添加、删除或修改。所有这些变化都被认为是所要求保护的本发明的一部分。

[0055] 虽然已经描述了本发明的优选实施例,但是应理解,对本领域技术人员,无论是现在还是将来,可以进行落在下面的权利要求的范围内的各种改进和增强。这些权利要求应该被解释为保持对于先描述的本发明的适当的保护。

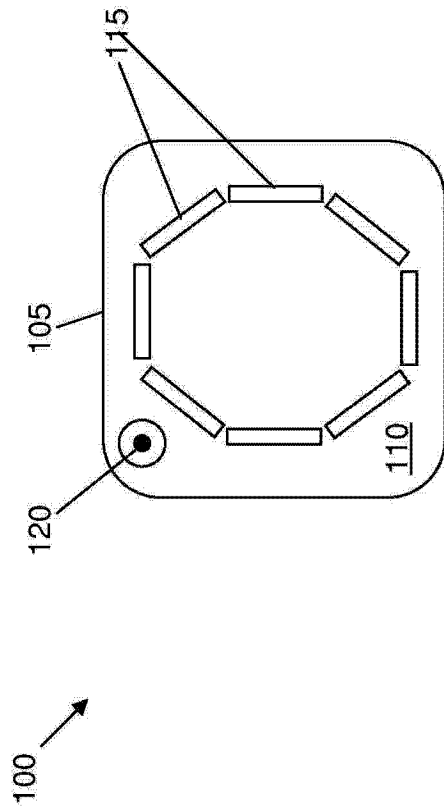


图 1

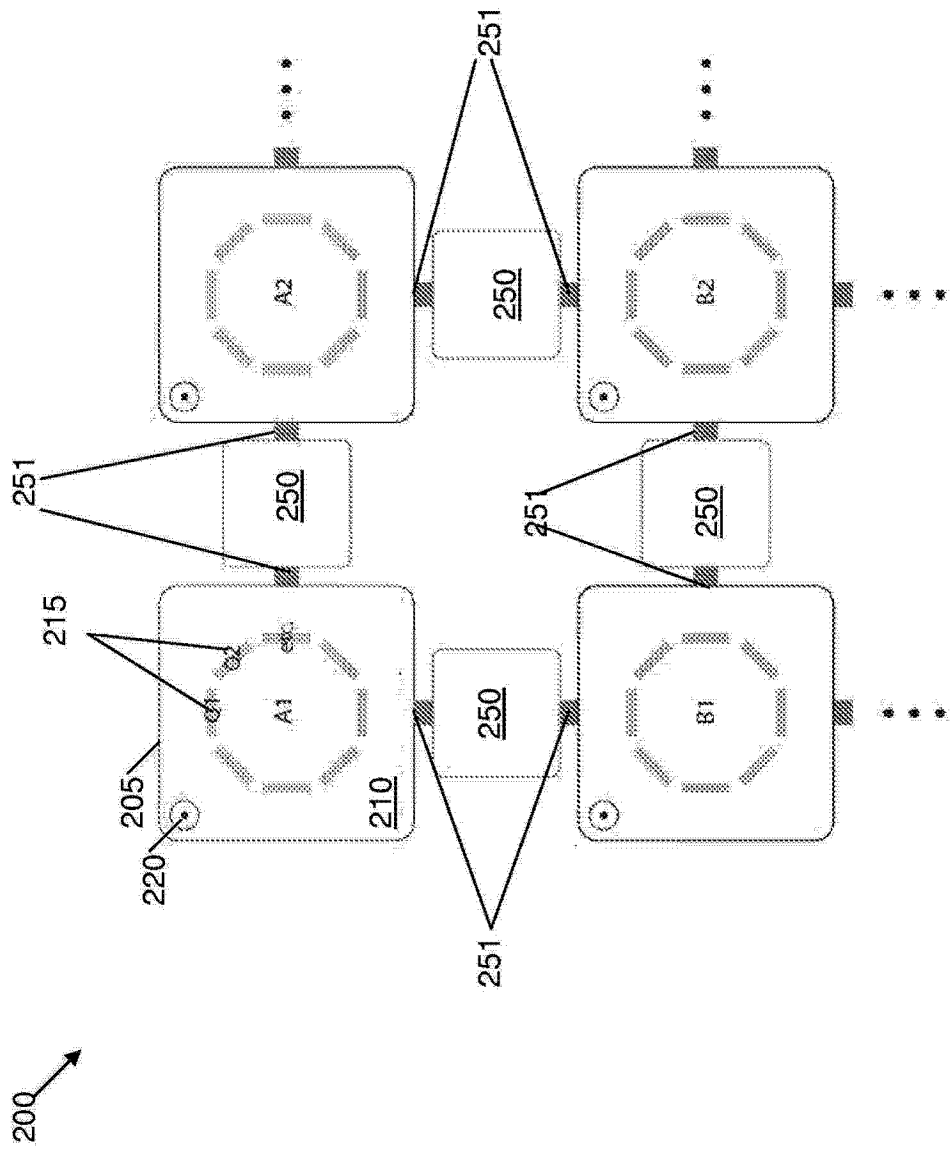


图 2

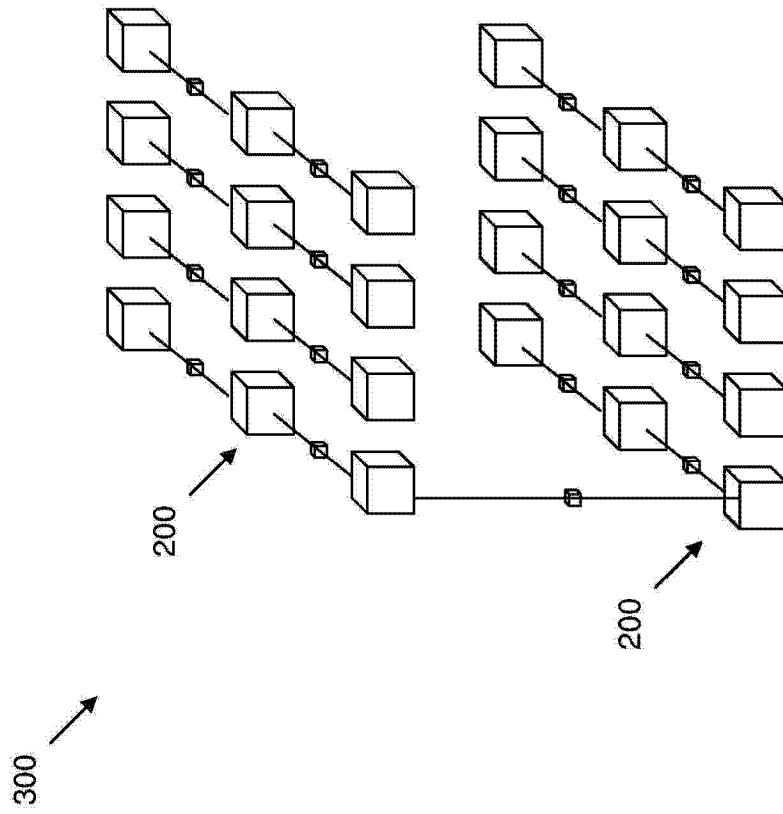


图 3

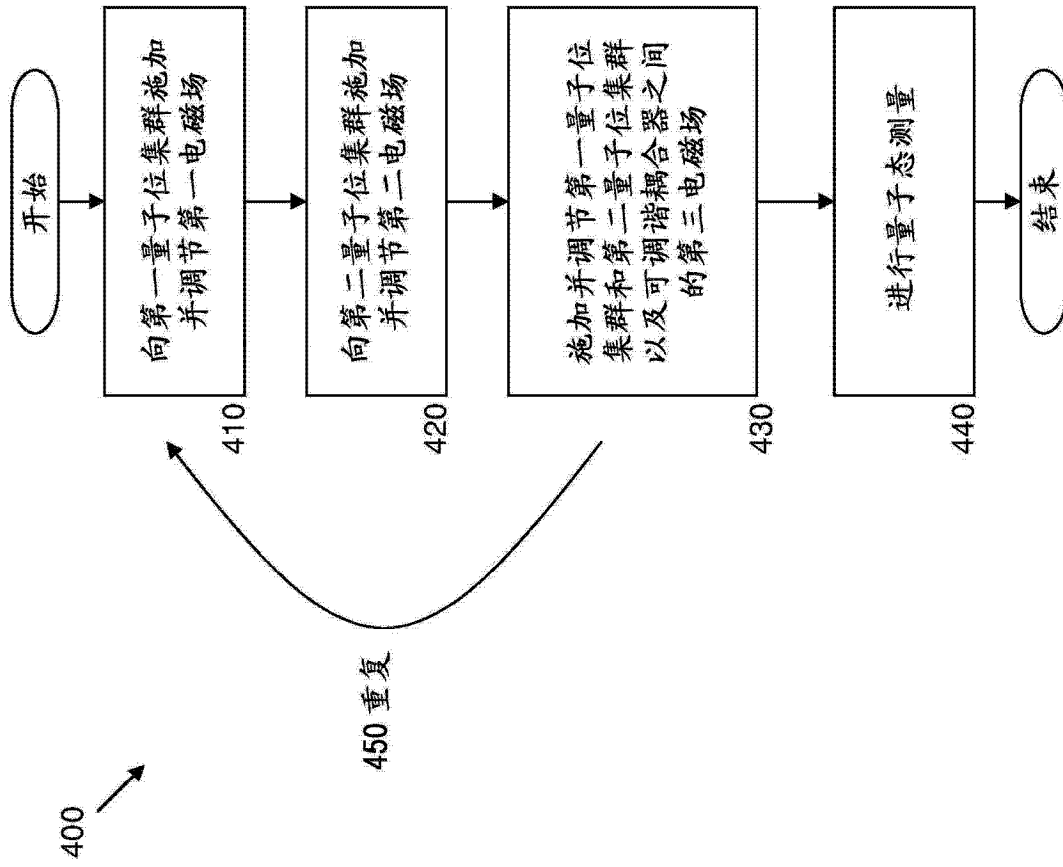


图 4