



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117494829 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 26

(21) 申请号 202311443590.0

G06N 10/70 (2022.01)

(22) 申请日 2023.11.01

G01R 31/28 (2006.01)

G01R 31/317 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117494829 A

(56) 对比文件

CN 111291891 A, 2020.06.16

CN 114330727 A, 2022.04.12

(43) 申请公布日 2024.02.02

(73) 专利权人 北京百度网讯科技有限公司

地址 100085 北京市海淀区上地十街10号

百度大厦2层

审查员 张骞

(72) 发明人 汪景波 黄晨

(74) 专利代理机构 北京市汉坤律师事务所

11602

专利代理师 姜浩然 吴丽丽

(51) Int. Cl.

G06N 10/40 (2022.01)

G06N 10/60 (2022.01)

权利要求书3页 说明书10页 附图5页

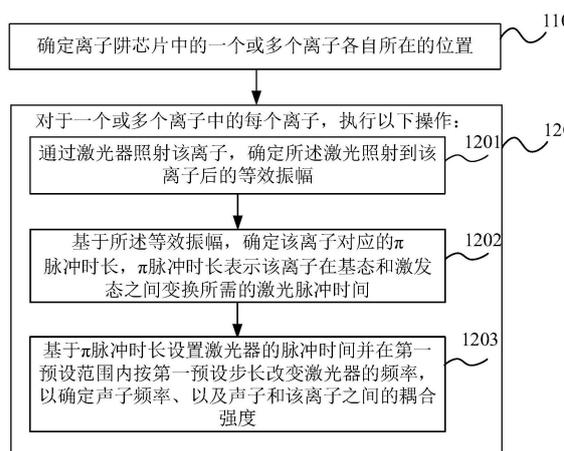
(54) 发明名称

离子阱芯片参数标定方法及装置、电子设备和介质

(57) 摘要

本公开提供了一种离子阱芯片参数标定方法、装置、电子设备、计算机可读存储介质和计算机程序产品,涉及量子计算领域,尤其涉及离子阱芯片技术领域。实现方案为:确定离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;对于一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作:通过激光器照射该离子,确定激光照射到该离子后的等效振幅;基于等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长;以及基于 π 脉冲时长设置激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变激光器的频率,以确定声子频率、以及所子和该离子之间的耦合强度。 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间。

100



1. 一种离子阱芯片参数标定方法,包括:

确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;

对于所述一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作:

通过激光器照射该离子,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅;

基于所述等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长,其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间;以及

基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率,以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度,包括:

获取所述激光器的预设脉冲时间;

在所述预设脉冲时间下,在所述第一预设范围内按所述第一预设步长改变所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差,

以确定该离子在每个频率差下处于激发态的概率;以及

基于所述每个频率差各自对应的所述概率,进行第二函数拟合,以基于拟合得到的第二函数确定所述声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置包括:在第二预设范围内按第二预设步长改变所述激光器的入射角度,以通过荧光成像确定一个或多个离子各自所在的位置。

3. 如权利要求1所述的方法,其中,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅包括:

确定该离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差,以基于所述频率差确定所述激光器的频率;

在第三预设范围内按第三预设步长改变所述激光器的脉冲时间,并测量在每个脉冲时间下通过所述激光器照射该离子后,该离子处于激发态的概率;以及

基于所述每个脉冲时间各自对应的所述概率,进行第一函数拟合,以基于拟合得到的第一函数确定所述等效振幅。

4. 如权利要求3所述的方法,其中,基于以下公式进行所述第一函数拟合:

$$P_e(t) = A \sin^2(2\pi\Omega_j t + \varphi) + B$$

其中, $P_e(t)$ 表示该离子处于激发态的概率,A为振幅, Ω_j 为第j个离子对应的所述等效振幅,t为所述激光器的脉冲时间, φ 为相位,B为偏置。

5. 如权利要求2或3所述的方法,其中,通过以下公式确定该离子对应的 π 脉冲时长 T_π :

$$T_\pi = \pi/(2\Omega_j)$$

其中, Ω_j 为第j个离子对应的所述等效振幅。

6. 如权利要求1所述的方法,其中,基于以下公式进行所述第二函数拟合:

$$P_e(\tau, \Delta\omega_{laser})$$

$$= \frac{\eta^2 \Omega_{j,k}^2}{\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2} \sin^2\left(\sqrt{(\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2)\tau}\right)$$

其中, $P_e(\tau, \Delta\omega_{laser})$ 表示第j个离子处于激发态的布局数, τ 为所述预设脉冲时间, $\Delta\omega_{laser}$ 为所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差, η 为第k个声子和该第j个离

子之间的耦合强度, ω_k 为所述声子频率, $\Omega_{j,k} = \Omega_j \times b_{j,k}$, 其中 Ω_j 为该第j个离子对应的等效振幅, $b_{j,k}$ 为该第j个离子在所述第k个声子对应的振动模式下的位移程度。

7. 如权利要求1所述的方法, 其中, 获取所述激光器的预设脉冲时间包括: 将所述预设脉冲时间设置等于为所述 π 脉冲时长或者在预设的误差范围内接近于所述 π 脉冲时长。

8. 一种离子阱芯片参数标定装置, 包括:

确定单元, 配置为确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;

操作执行单元, 配置为对于所述一个或多个离子中的每个离子, 执行以下操作:

第一确定子单元, 配置为通过激光器照射该离子, 确定所述激光照射到该离子后的等效振幅;

第二确定子单元, 配置为基于所述等效振幅, 确定该离子对应的 π 脉冲时长, 其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间; 以及

第三确定子单元, 配置为基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间, 并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率, 以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度, 其中, 所述第三确定子单元包括:

用于获取所述激光器的预设脉冲时间的单元;

用于在所述预设脉冲时间下, 在所述第一预设范围内按所述第一预设步长改变所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差、以确定该离子在每个频率差下处于激发态的概率的单元; 以及

用于基于所述每个频率差各自对应的所述概率进行第二函数拟合、以基于拟合得到的第二函数确定所述声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度的单元。

9. 如权利要求8所述的装置, 其中, 所述确定单元包括: 用于在第二预设范围内按第二预设步长改变所述激光器的入射角度、以通过荧光成像确定一个或多个离子各自所在的位置的单元。

10. 如权利要求8所述的装置, 其中, 所述第一确定子单元包括:

用于确定该离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差、以基于所述频率差确定所述激光器的频率的单元;

用于在第三预设范围内按第三预设步长改变所述激光器的脉冲时间、并测量在每个脉冲时间下通过所述激光器照射该离子后、该离子处于激发态的概率的单元; 以及

用于基于所述每个脉冲时间各自对应的所述概率进行第一函数拟合、以基于拟合得到的第一函数确定所述等效振幅的单元。

11. 如权利要求10所述的装置, 其中, 基于以下公式进行所述第一函数拟合:

$$P_e(t) = A \sin^2(2\pi\Omega_j t + \varphi) + B$$

其中, $P_e(t)$ 表示该离子处于激发态的概率, A 为振幅, Ω_j 为第j个离子对应的所述等效振幅, t 为所述激光器的脉冲时间, φ 为相位, B 为偏置。

12. 如权利要求9或10所述的装置, 其中, 通过以下公式确定该离子对应的 π 脉冲时长 T_π :

$$T_\pi = \pi / (2\Omega_j)$$

其中, Ω_j 为第j个离子对应的所述等效振幅。

13. 如权利要求8所述的装置, 其中, 基于以下公式进行所述第二函数拟合:

$$P_e(\tau, \Delta\omega_{laser}) = \frac{\eta^2 \Omega_{j,k}^2}{\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2} \sin^2\left(\sqrt{(\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2)\tau}\right)$$

其中, $P_e(\tau, \Delta\omega_{laser})$ 表示第 j 个离子处于激发态的布局数, τ 为所述预设脉冲时间, $\Delta\omega_{laser}$ 为所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差, η 为第 k 个声子和该第 j 个离子之间的耦合强度, ω_k 为所述声子频率, $\Omega_{j,k} = \Omega_j \times b_{j,k}$, 其中 Ω_j 为该第 j 个离子对应的等效振幅, $b_{j,k}$ 为该第 j 个离子在所述第 k 个声子对应的振动模式下的位移程度。

14. 如权利要求8所述的装置, 其中, 将所述预设脉冲时间设置等于为所述 π 脉冲时长或者在预设的误差范围内接近于所述 π 脉冲时长。

15. 一种电子设备, 包括:

至少一个处理器; 以及

与所述至少一个处理器通信连接的存储器; 其中

所述存储器存储有可被所述至少一个处理器执行的指令, 所述指令被所述至少一个处理器执行, 以使所述至少一个处理器能够执行权利要求1-7中任一项所述的方法。

16. 一种存储有计算机指令的非瞬时计算机可读存储介质, 其中, 所述计算机指令用于使所述计算机执行根据权利要求1-7中任一项所述的方法。

17. 一种计算机程序产品, 包括计算机程序, 其中, 所述计算机程序在被处理器执行时实现权利要求1-7中任一项所述的方法。

离子阱芯片参数标定方法及装置、电子设备和介质

技术领域

[0001] 本公开涉及量子计算机领域,尤其涉及离子阱芯片技术领域,具体涉及一种离子阱芯片参数标定方法、装置、电子设备、计算机可读存储介质和计算机程序产品。

背景技术

[0002] 离子阱量子计算是一种基于悬浮在真空中的离子作为量子比特(qubit)进行信息处理的技术,因为单个离子内部天然具备分立的能级自由度,如电子轨道能级、自旋轨道耦合能级、核自旋能级,因此天然适合用作理想的量子比特载体。用离子来构建量子比特并进行量子计算操作的技术被称之为离子阱量子计算。

[0003] 为了实现高保真度的量子操作,研究人员需要精确标定离子阱系统的参数,包括激光、声子频率、离子间相互作用等。这些参数的精确标定能够提高离子阱中量子操作的效率和精度,从而提高离子阱量子计算的性能。

发明内容

[0004] 本公开提供了一种离子阱芯片参数标定方法、装置、电子设备、计算机可读存储介质和计算机程序产品。

[0005] 根据本公开的一方面,提供了一种离子阱芯片参数标定方法,包括:确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;对于所述一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作:通过激光器照射该离子,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅;基于所述等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长,其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间;以及基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率,以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度。

[0006] 根据本公开的另一方面,提供了一种离子阱芯片参数标定装置,包括:确定单元,配置为确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;操作执行单元,配置为对于所述一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作:第一确定子单元,配置为通过激光器照射该离子,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅;第二确定子单元,配置为基于所述等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长,其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间;以及第三确定子单元,配置为基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率,以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度。

[0007] 根据本公开的另一方面,提供了一种电子设备,包括:至少一个处理器;以及至少一个处理器通信连接的存储器;存储器存储有可被至少一个处理器执行的指令,该指令被至少一个处理器执行,以使至少一个处理器能够执行本公开所述的方法。

[0008] 根据本公开的另一方面,提供了一种存储有计算机指令的非瞬时计算机可读存储介质,该计算机指令用于使计算机执行本公开所述的方法。

[0009] 根据本公开的另一方面,提供了一种计算机程序产品,包括计算机程序,该计算机程序在被处理器执行时实现本公开所述的方法。

[0010] 根据本公开的一个或多个实施例,可以减少人工干预和实验操作的复杂性,大大降低了实验误差,提高了参数标定精度,并且具有很强的适应性和灵活性,能够在不同的实验条件下实现参数优化。

[0011] 应当理解,本部分所描述的内容并非旨在标识本公开的实施例的关键或重要特征,也不用于限制本公开的范围。本公开的其他特征将通过以下的说明书而变得容易理解。

附图说明

[0012] 附图示例性地示出了实施例并且构成说明书的一部分,与说明书的文字描述一起用于讲解实施例的示例性实施方式。所示出的实施例仅出于例示的目的,并不限制权利要求的范围。在所有附图中,相同的附图标记指代类似但不一定相同的要素。

[0013] 图1示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数标定方法的流程图;

[0014] 图2示出了根据本公开的实施例的通过扫描激光和荧光成像确定离子位置的示意图;

[0015] 图3示出了根据本公开的实施例的确定激光照射到该离子后的等效振幅的流程图;

[0016] 图4示出了根据本公开的实施例的通过Rabi实验所获得到波形示意图;

[0017] 图5示出了根据本公开的实施例的确定声子频率和耦合强度的流程图;

[0018] 图6示出了根据本公开的实施例的包括主跃迁和红蓝边带跃迁的能级示意图;

[0019] 图7示出了根据本公开的实施例的通过Ramsey扫频实验所获得到波形示意图;

[0020] 图8示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数标定装置的结构框图;以及

[0021] 图9示出了能够用于实现本公开的实施例的示例性电子设备的结构框图。

具体实施方式

[0022] 以下结合附图对本公开的示范性实施例做出说明,其中包括本公开实施例的各种细节以助于理解,应当将它们认为仅仅是示范性的。因此,本领域普通技术人员应当认识到,可以对这里描述的实施例做出各种改变和修改,而不会背离本公开的范围。同样,为了清楚和简明,以下的描述中省略了对公知功能和结构的描述。

[0023] 在本公开中,除非另有说明,否则使用术语“第一”、“第二”等来描述各种要素不意图限定这些要素的位置关系、时序关系或重要性关系,这种术语只是用于将一个元件与另一元件区分开。在一些示例中,第一要素和第二要素可以指向该要素的同一实例,而在某些情况下,基于上下文的描述,它们也可以指代不同实例。

[0024] 在本公开中对各种所述示例的描述中所使用的术语只是为了描述特定示例的目的,而并非旨在进行限制。除非上下文另外明确地表明,如果不特意限定要素的数量,则该要素可以是一个也可以是多个。此外,本公开中所使用的术语“和/或”涵盖所列出的项目中的任何一个以及全部可能的组合方式。

[0025] 下面将结合附图详细描述本公开的实施例。

[0026] 迄今为止,正在应用中的各种不同类型的计算机都是以经典物理学为信息处理的

理论基础,称为传统计算机或经典计算机。经典信息系统采用物理上最容易实现的二进制数据位存储数据或程序,每一个二进制数据位由0或1表示,称为一个位或比特,作为最小的信息单元。经典计算机本身存在着不可避免的弱点:一是计算过程能耗的最基本限制。逻辑元件或存储单元所需的最低能量应在 kT 的几倍以上,以避免在热胀落下的误动作;二是信息熵与发热能耗;三是计算机芯片的布线密度很大时,根据海森堡不确定性关系,电子位置的不确定量很小时,动量的不确定量就会很大。电子不再被束缚,会有量子干涉效应,这种效应甚至会破坏芯片的性能。

[0027] 量子计算机(quantum computer)是一类遵循量子力学性质、规律进行高速数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的物理设备。当某个设备处理和计算的是量子信息,运行的是量子算法时,他就是量子计算机。量子计算机遵循着独一无二的量子动力学规律(特别是量子干涉)来实现一种信息处理的新模式。对计算问题并行处理,量子计算机比起经典计算机有着速度上的绝对优势。量子计算机对每一个叠加分量实现的变换相当于一种经典计算,所有这些经典计算同时完成,并按一定的概率振幅叠加起来,给出量子计算机的输出结果,这种计算称为量子并行计算。量子并行处理大大提高了量子计算机的效率,使得其可以完成经典计算机无法完成的工作,例如一个很大的自然数的因子分解。量子相干性在所有的量子超快速算法中得到了本质性的利用。因此,用量子态代替经典态的量子并行计算,可以达到经典计算机不可比拟的运算速度和信息处理功能,同时节省了大量的运算资源。

[0028] 离子阱量子计算的关键优点包括长的量子相干时间、高精度的单量子比特和两量子比特操作,以及在系统中的任何两个量子比特之间的高保真度操作。目前业界常用的量子比特载体有Yb、Ca、Ba、Sr等离子。在离子阱量子计算中,单量子比特操作一般只涉及到离子内部能级,通过激光脉冲寻址到相应的离子上即可完成单量子比特操控。而多个量子比特之间的操控需要用到离子链中的集体振动模式--声子。而离子(量子比特)位置、声子频率、离子和声子的相互作用大小等重要参数往往和离子阱芯片的结构、所处环境以及束缚电势的构成息息相关。

[0029] 为了实现高性能的离子阱量子计算,离子阱系统的参数标定至关重要。为了实现高保真度的量子操作,研究人员需要精确标定离子阱系统的参数,包括激光、声子频率、离子间相互作用等。

[0030] 在离子阱量子控制中,阱中的每个离子代表一个量子比特,离子的两个内态 $|\downarrow\rangle, |\uparrow\rangle$ 正好可以表示为量子比特的 $|0\rangle, |1\rangle$ 态。如果需要将两个量子比特纠缠起来,往往需要引导激光照射到两个离子上,而两个被激光作用的离子,在电荷库伦相互作用,共享离子链中量子化的声子模式。这样的实验系统,其等效哈密顿量一般与离子阱系统的参数有关,包括激光频率、振幅和相位,声子频率、耦合强度等。其中,实验上一般通过调节激光脉冲的振幅和相位,从而实现等效哈密顿量的调节。

[0031] 从而,在基于该离子阱系统的量子操作中,可以基于所标定的参数实现相应的量子操作。例如,基于更精确的系统参数对激光脉冲进行调制,通过将激光脉冲作用于相应离子,获得更精确的量子比特门。因此,这些参数的精确标定可以提升离子阱中量子操作的效率和精度,从而提高离子阱量子计算的性能。

[0032] 通过对离子阱芯片的参数进行标定,可以1)提高量子操作保真度:通过精确标定离子阱系统的参数,可以有效减小系统误差,提高单比特和两比特门操作的保真度;2)降低

误差积累:在执行复杂的量子算法时,较低的误差率将可以降低误差积累,从而提高算法的可靠性;3) 优化量子资源利用:精确的参数标定可以帮助研究人员更好地利用有限的量子资源,实现高效的量子操作;4) 提高系统性能评估的准确性:离子阱标定可以为系统性能评估提供更准确的数据,使得研究人员更好地了解系统的优缺点。

[0033] 离子阱标定技术在离子阱量子计算的实验和应用中具有重要意义。通过精确标定离子阱系统的参数,研究人员可以实现高保真度的量子操作,降低误差积累,优化量子资源利用,提高系统性能评估的准确性。离子阱标定技术在量子模拟、量子优化、量子通信、量子计算基础研究等领域具有广泛的应用前景。随着离子阱量子计算技术的不断发展,离子阱标定技术将在未来量子计算领域的实验和应用中发挥更加重要的作用。

[0034] 离子阱实验中,首先需要对搭建好的离子阱系统进行标定。在以往的标定中,往往会通过经验和人工调试的方式去寻找合适的实验参数,比如通过不断观察离子在电荷耦合器件 (CCD) 计数器中的探测响应数目,判定作用在离子上的激光器功率有多大,进而反向推算进行量子门操作中,等效的Rabi振幅大小。而对于多比特中两个离子的等效相互作用强度,往往是通过两个离子布局数的Parity实验进行标定。

[0035] 对于上述一般的离子阱实验参数标定方式,其主要由以下几个缺点:自动化程度不足:这种方案虽然可以实现一定程度的离子阱实验参数标定,但往往效率不高,需要借助实验人员丰富的经验确定相关参数;效率低:通常离子阱硬件平台搭建完毕后,用人工的方式通常需要几周的时间才能标定好搭建好的硬件平台的性能参数,确定后续进行量子操作的脉冲信息;准确性较差:因为要借助人工的经验进行标定,其准确性受限,而且无法经常性的进行校准,代价耗费大。

[0036] 因此,根据本公开的实施例提供了一种离子阱芯片参数标定方法。图1示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数标定方法的流程图。如图1所示,方法100包括:确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置(步骤110);对于所述一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作(步骤120):通过激光器照射该离子,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅(步骤1201);基于所述等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长,其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间(步骤1202);以及基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率,以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度(步骤1203)。

[0037] 根据本公开实施例的离子阱芯片参数标定方法,可以减少人工干预和实验操作的复杂性,大大降低了实验误差,提高了参数标定精度,并且具有很强的适应性和灵活性,能够在不同的实验条件下实现参数优化。

[0038] 在一些示例中,通过所标定的离子位置、声子频率、耦合强度等参数,再进一步通过调节激光脉冲的参数(例如振幅和相位),并将激光脉冲作用于相应离子,获得更精确的量子比特门。

[0039] 由于离子阱量子计算的特殊性,其作为量子比特的离子漂浮在离子阱芯片上方 $10 \sim 100\mu\text{m}$ 空间处,每两个离子之间的距离同总的离子数目相关,大约在 $2 \sim 10\mu\text{m}$ 。离子之间一般不等距,呈现中间密、两边疏的特点。作为离子阱量子计算的第一步,首先需要在空间上找到量子比特所在的位置,才能进行后续的量子操作。

[0040] 根据一些实施例,确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置包

括:在第二预设范围内按第二预设步长改变所述激光器的入射角度,以通过荧光成像确定一个或多个离子各自所在的位置。

[0041] 在一些示例中,可以通过扫描激光法逐个扫描离子阱中的多个离子,以找到该多个离子各自的位置。扫描激光法,即,如果离子阱中有多个离子,可以使用激光逐个扫描离子。通过改变激光束的入射位置并监测荧光信号,可以找到离子的位置。当激光束与某个离子重合时,荧光信号会发生显著变化,从而确定离子的位置。图2示出了根据本公开的实施例的通过扫描激光和荧光成像确定离子(量子比特)位置的示意图。

[0042] 具体地,可以通过荧光成像和扫描激光束的方式标定离子位置。通过激光冷却离子并将其激发至较高能级,离子会发射荧光光子并退激回到基态。这些荧光光子可以通过成像系统(如光学显微镜和光电倍增管或者电荷耦合器件(CCD)相机)被收集和检测。由于荧光信号强度与离子位置和激光光束之间的交叠程度有关,通过对收集到的荧光成像进行处理和分析,可以找到离子所在的位置。

[0043] 可以理解的是,离子在其相应位置有轻微的微小移动,因此所确定的离子所在位置也可以称为中心位置,在此不作限制。

[0044] 根据一些实施例,如图3所示,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅(步骤1201)包括:确定该离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差,以基于所述频率差确定所述激光器的频率(步骤310);在第三预设范围内按第三预设步长改变所述激光器的脉冲时间,并测量在每个脉冲时间下通过所述激光器照射该离子后,该离子处于激发态的概率(步骤320);以及基于所述每个脉冲时间各自对应的所述概率,进行第一函数拟合,以基于拟合得到的第一函数确定所述等效振幅(步骤330)。

[0045] 在确定好每个离子所在位置后,即每个离子所对应的激光器的入射角度,即可通过设置相应的激光入射角度来寻址相应的离子。激光经过光路和光纤,照射到相应的离子,并进一步确定激光照射到相应离子后的等效振幅 Ω_j (对应于第j个离子)。

[0046] 如上所述,激光器的入射角度 θ_j 已经确定,激光器的频率可以固定成离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差,通过Rabi实验确定激光的等效振幅。具体地,在一些示例中,在固定的激光入射角度下,在不同的激光脉冲时间下,应用激光脉冲于离子(即量子比特),并测量在每个脉冲时间下该离子处于激发态的概率。通常,这可以通过检测荧光信号来实现。随着脉冲时间的增加,激发态概率将呈现周期性振荡,这种振荡被称为Rabi振荡。通过对收集到的数据进行拟合,以基于拟合得到的函数确定等效振幅(即Rabi频率)。

[0047] 在一些示例中,可以理解的时,能够拟合得到一个正弦波形函数。因此,根据一些实施例,可以基于以下公式进行所述第一函数拟合:

$$[0048] \quad P_e(t) = A \sin^2(2\pi\Omega_j t + \varphi) + B$$

[0049] 其中, $P_e(t)$ 表示该离子处于激发态的概率,A为振幅, Ω_j 为该第j个离子对应的所述等效振幅,t为所述激光器的脉冲时间, φ 为相位,B为偏置。图4示出了根据本公开的实施例的通过Rabi实验所获得到波形示意图。

[0050] 在拟合函数中提取出Rabi频率 Ω_j (等效振幅)后,即可基于该关键参数确定 π 脉冲时长。 π 脉冲时长指的是从基态到激发态(或从激发态到基态)所需的激光脉冲时间、使得量子比特跃迁概率接近1。

[0051] 根据一些实施例,可以通过以下公式确定该离子对应的 π 脉冲时长 T_π :

$$[0052] \quad T_\pi = \pi / (2\Omega_j)$$

[0053] 其中, Ω_j 为该第j个离子对应的所述等效振幅。

[0054] 根据一些实施例,如图5所示,确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度(步骤1203)包括:获取所述激光器的预设脉冲时间(步骤510);在所述预设脉冲时间下,在所述第一预设范围内按所述第一预设步长改变所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差,以确定该离子在每个频率差下处于激发态的概率(步骤520);以及基于所述每个频率差各自对应的所述概率,进行第二函数拟合,以基于拟合得到的第二函数确定所述声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度(步骤530)。

[0055] 在该实施例中,在确定好等效的Rabi频率后,通过Ramsey扫频实验,固定脉冲时间 τ ,连续改变激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差,测量量子比特处于激发态的布局数(即测量每个频率差下量子比特处于激发态的概率),确定声子频率以及声子和离子之间的耦合强度大小。

[0056] 具体地,在一些示例中,可以把Rabi实验当做是离子中的主跃迁,离子从基态 $|g\rangle$ 态到激发态 $|e\rangle$ 态的跃迁中,不涉及耦合的声子态 $|n\rangle$ 的改变。而如果激光频率偏离基态到激发态的能量差正好一个声子能量 $\hbar\omega_k$,如图6所示,可以预见测量的激发态 $|e\rangle$ 布局数会有一个显著的特征,通过理论推导,可以得到离子阱Ramsey实验中,激发态布局数和频率关系满足预设函数关系。

[0057] 因此,根据一些实施例,可以基于以下公式进行所述第二函数拟合:

$$P_e(\tau, \Delta\omega_{laser})$$

$$[0058] \quad = \frac{\eta^2 \Omega_{j,k}^2}{\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2} \sin^2\left(\sqrt{(\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta\omega_{laser} - \omega_k)^2)\tau}\right)$$

[0059] 其中, $P_e(\tau, \Delta\omega_{laser})$ 表示该第j个离子处于激发态的布局数, τ 为所述预设脉冲时间, $\Delta\omega_{laser}$ 为所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差, η 为第k个声子和该第j个离子之间的耦合强度, ω_k 为所述声子频率, $\Omega_{j,k} = \Omega_j \times b_{j,k}$,其中 Ω_j 为该第j个离子对应的等效振幅, $b_{j,k}$ 为该第j个离子在所述第k个声子对应的振动模式下的位移程度。

[0060] 可以理解的是, $b_{j,k}$ 可以通过离子在平衡位置的微扰后,计算微扰矩阵得到,其只和离子阱芯片的结构有关。因此,在确定了离子所在的位置后,即可方便地获取该 $b_{j,k}$ 的值,在此不再赘述。

[0061] 根据一些实施例,获取所述激光器的预设脉冲时间包括:将所述预设脉冲时间设置等于为所述 π 脉冲时长或者在预设的误差范围内接近于所述 π 脉冲时长。

[0062] 因此,通过固定的脉冲作用时间 τ ,连续改变 $\Delta\omega_{laser}$,即可拟合出声子频率 ω_k 和离子声子相互作用系数 η (即耦合强度,又称Lamb-Dicke系数)的大小。图7示出了根据本公开的实施例的通过Ramsey扫频实验所获得到波形示意图。其中,可以看出在预设脉冲时间下,处于激发态布局数随频率的变化关系。

[0063] 在标定完一个离子后,即可改变激光器入射角度以寻址下一个待标定离子,重复相应的标定流程,完成下一个离子的等效振幅(即Rabi频率)、声子频率、以及声子离子之间的耦合强度,直到所有离子均标定完成。

[0064] 在根据本公开的一个示例性实施例中,以处于线性离子阱结构中的五个离子比特作为案例,展示根据本公开实施例所述的标定方法的效果。首先,可以预设一个离子阱的黑盒子,其内部实验参数已预置完成。然后,对比根据本公开实施例所述方法进行标定与预置参数之间的差异,如表1所示。

预置参数类别	离子位置	等效 Rabi 频率	声子频率	Lamb-Dicke 系数大小
预置参数方式	[-10,-4,0,4,10]	[1, 0.95, 0.92, 0.90, 0.88]	[2,3,5,8,11]MHz	[0.05,0.03,0.01, 0.03,0.05]
[0065] 本公开实施例所述方式	[-10.02, -4.03, 0.01, 3.98, 10.02]	[1.0004, 0.9405, 0.9196, 0.9003, 0.8833]	[2.0027, 3.0007, 5.0039, 8.0024, 10.9941]MHz	[0.0498, 0.02997, 0.01002, 0.03005, 0.049958]
相对差异	[0.2, 0.75, NAN, 0.5, 0.2]%]	[0.04, 1.0, 0.04, 0.03, 0.4]%]	[0.13, 0.02, 0.08, 0.03, 0.05]%]	[0.4, 0.1, 0.2, 0.17, 0.08]%]

[0066] 表1

[0067] 可以看出,根据本公开实施例所述的标定方法可以在较小的误差范围内完成离子阱芯片中相关参数的标定,具有较高的精度。

[0068] 根据本公开的实施例的标定方法,可以减少人工干预和实验操作的复杂性。自动化流程可以通过内置算法、传感器和反馈控制系统实现参数调整和优化。这将大大降低实验误差,提高标定精度,并允许研究人员将注意力集中在其他重要任务上。通过并行处理和实时反馈机制加快了标定速度。由于算法可以自动选择最佳的扫描范围和步长,因此可以在更短的时间内完成标定过程。这使得实验室能够更快地进行调整和优化,从而提高整体研究进度。

[0069] 在离子阱量子计算系统中,实验参数的稳定性对量子操作的性能至关重要。根据本公开实施例的标定方法可以实时监测并校准系统参数,确保它们始终保持在最佳状态。这能够降低噪声和其他不稳定因素对实验结果的影响,从而提高系统稳定性。并且,根据本公开实施例的标定方法具有很强的适应性和灵活性,能够在不同的实验条件下实现参数优化。随着量子计算技术的快速发展,可能会出现新的硬件和软件需求。根据本公开实施例的标定方法可以快速适应这些变化,确保系统始终保持在最佳性能状态。此外,根据本公开实施例的标定方法还可以轻松地应用于不同类型的离子阱量子计算平台,具有很高的通用性。

[0070] 根据本公开的实施例,如图8所示,还提供了一种离子阱芯片参数标定装置800,包括:确定单元810,配置为确定所述离子阱芯片中的一个或多个离子各自所在的位置;操作执行单元820,配置为对于所述一个或多个离子中的每个离子,执行以下操作:第一确定子单元8201,配置为通过激光器照射该离子,确定所述激光照射到该离子后的等效振幅;第二确定子单元8202,配置为基于所述等效振幅,确定该离子对应的 π 脉冲时长,其中所述 π 脉冲时长表示该离子在基态和激发态之间变换所需的激光脉冲时间;以及第三确定子单元8203,配置为基于所述 π 脉冲时长设置所述激光器的脉冲时间,并在第一预设范围内按第一预设步长改变所述激光器的频率,以确定声子频率、以及所述声子和该离子之间的耦合强度。

[0071] 这里,离子阱芯片参数标定装置800的上述各单元810~820的操作分别与前面描述的步骤110~120的操作类似,在此不再赘述。

[0072] 根据本公开的实施例,还提供了一种电子设备、一种可读存储介质和一种计算机程序产品。

[0073] 参考图9,现将描述可以作为本公开的服务器或客户端的电子设备900的结构框图,其是可以应用于本公开的各方面的硬件设备的示例。电子设备旨在表示各种形式的数字电子的计算机设备,诸如,膝上型计算机、台式计算机、工作台、个人数字助理、服务器、刀片式服务器、大型计算机、和其它适合的计算机。电子设备还可以表示各种形式的移动装置,诸如,个人数字处理、蜂窝电话、智能电话、可穿戴设备和其它类似的计算装置。本文所示的部件、它们的连接和关系、以及它们的功能仅仅作为示例,并且不意在限制本文中描述的和/或者要求的本公开的实现。

[0074] 如图9所示,电子设备900包括计算单元901,其可以根据存储在只读存储器(ROM)902中的计算机程序或者从存储单元908加载到随机访问存储器(RAM)903中的计算机程序,来执行各种适当的动作和处理。在RAM 903中,还可存储电子设备900操作所需的各种程序和数据。计算单元901、ROM 902以及RAM 903通过总线904彼此相连。输入/输出(I/O)接口905也连接至总线904。

[0075] 电子设备900中的多个部件连接至I/O接口905,包括:输入单元906、输出单元907、存储单元908以及通信单元909。输入单元906可以是能向电子设备900输入信息的任何类型的设备,输入单元906可以接收输入的数字或字符信息,以及产生与电子设备的用户设置和/或功能控制有关的键信号输入,并且可以包括但不限于鼠标、键盘、触摸屏、轨迹板、轨迹球、操作杆、麦克风和/或遥控器。输出单元907可以是能呈现信息的任何类型的设备,并且可以包括但不限于显示器、扬声器、视频/音频输出终端、振动器和/或打印机。存储单元908可以包括但不限于磁盘、光盘。通信单元909允许电子设备900通过诸如因特网的计算机网络和/或各种电信网络与其他设备交换信息/数据,并且可以包括但不限于调制解调器、网卡、红外通信设备、无线通信收发机和/或芯片组,例如蓝牙设备、802.11设备、WiFi设备、WiMax设备、蜂窝通信设备和/或类似物。

[0076] 计算单元901可以是各种具有处理和计算能力的通用和/或专用处理组件。计算单元901的一些示例包括但不限于中央处理单元(CPU)、图形处理单元(GPU)、各种专用的人工智能(AI)计算芯片、各种运行机器学习模型算法的计算单元、数字信号处理器(DSP)、以及任何适当的处理器、控制器、微控制器等。计算单元901执行上文所描述的各个方法和处理,例如方法100。例如,在一些实施例中,方法100可被实现为计算机软件程序,其被有形地包含于机器可读介质,例如存储单元908。在一些实施例中,计算机程序的部分或者全部可以经由ROM 902和/或通信单元909而被载入和/或安装到电子设备900上。当计算机程序加载到RAM 903并由计算单元901执行时,可以执行上文描述的方法100的一个或多个步骤。备选地,在其他实施例中,计算单元901可以通过其他任何适当的方式(例如,借助于固件)而被配置为执行方法100。

[0077] 本文中以上描述的系统和技术和各种实施方式可以在数字电子电路系统、集成电路系统、场可编程门阵列(FPGA)、专用集成电路(ASIC)、专用标准产品(ASSP)、芯片上系统的系统(SOC)、复杂可编程逻辑设备(CPLD)、计算机硬件、固件、软件、和/或它们的组合中实

现。这些各种实施方式可以包括：实施在一个或者多个计算机程序中，该一个或者多个计算机程序可在包括至少一个可编程处理器的可编程系统上执行和/或解释，该可编程处理器可以是专用或者通用可编程处理器，可以从存储系统、至少一个输入装置、和至少一个输出装置接收数据和指令，并且将数据和指令传输至该存储系统、该至少一个输入装置、和该至少一个输出装置。

[0078] 用于实施本公开的方法的程序代码可以采用一个或多个编程语言的任何组合来编写。这些程序代码可以提供给通用计算机、专用计算机或其他可编程数据处理装置的处理器或控制器，使得程序代码当由处理器或控制器执行时使流程图和/或框图中所规定的功能/操作被实施。程序代码可以完全在机器上执行、部分地在机器上执行，作为独立软件包部分地在机器上执行且部分地在远程机器上执行或完全在远程机器或服务器上执行。

[0079] 在本公开的上下文中，机器可读介质可以是有形的介质，其可以包含或存储以供指令执行系统、装置或设备使用或与指令执行系统、装置或设备结合地使用的程序。机器可读介质可以是机器可读信号介质或机器可读储存介质。机器可读介质可以包括但不限于电子的、磁性的、光学的、电磁的、红外的、或半导体系统、装置或设备，或者上述内容的任何合适组合。机器可读存储介质的更具体示例会包括基于一个或多个线的电气连接、便携式计算机盘、硬盘、随机存取存储器 (RAM)、只读存储器 (ROM)、可擦除可编程只读存储器 (EPROM 或快闪存储器)、光纤、便捷式紧凑盘只读存储器 (CD-ROM)、光学储存设备、磁储存设备、或上述内容的任何合适组合。

[0080] 为了提供与用户的交互，可以在计算机上实施此处描述的系统和技术，该计算机具有：用于向用户显示信息的显示装置 (例如，CRT (阴极射线管) 或者 LCD (液晶显示器) 监视器)；以及键盘和指向装置 (例如，鼠标或者轨迹球)，用户可以通过该键盘和该指向装置来将输入提供给计算机。其它种类的装置还可以用于提供与用户的交互；例如，提供给用户的反馈可以是任何形式的传感反馈 (例如，视觉反馈、听觉反馈、或者触觉反馈)；并且可以用任何形式 (包括声输入、语音输入或者、触觉输入) 来接收来自用户的输入。

[0081] 可以将此处描述的系统和技术实施在包括后台部件的计算系统 (例如，作为数据服务器)、或者包括中间件部件的计算系统 (例如，应用服务器)、或者包括前端部件的计算系统 (例如，具有图形用户界面或者网络浏览器的用户计算机，用户可以通过该图形用户界面或者该网络浏览器来与此处描述的系统和技术实施方式交互)、或者包括这种后台部件、中间件部件、或者前端部件的任何组合的计算系统中。可以通过任何形式或者介质的数字数据通信 (例如，通信网络) 来将系统的部件相互连接。通信网络的示例包括：局域网 (LAN)、广域网 (WAN)、互联网和区块链网络。

[0082] 计算机系统可以包括客户端和服务端。客户端和服务端一般远离彼此并且通常通过通信网络进行交互。通过在相应的计算机上运行并且彼此具有客户端-服务器关系的计算机程序来产生客户端和服务端的关系。服务器可以是云服务器，也可以为分布式系统的服务器，或者是结合了区块链的服务器。

[0083] 应该理解，可以使用上面所示的各种形式的流程，重新排序、增加或删除步骤。例如，本公开中记载的各步骤可以并行地执行、也可以顺序地或以不同的次序执行，只要能够实现本公开公开的技术方案所期望的结果，本文在此不进行限制。

[0084] 虽然已经参照附图描述了本公开的实施例或示例，但应理解，上述的方法、系统和

设备仅仅是示例性的实施例或示例,本发明的范围并不由这些实施例或示例限制,而是仅由授权后的权利要求书及其等同范围来限定。实施例或示例中的各种要素可以被省略或者可由其等同要素替代。此外,可以通过不同于本公开中描述的次序来执行各步骤。进一步地,可以以各种方式组合实施例或示例中的各种要素。重要的是随着技术的演进,在此描述的很多要素可以由本公开之后出现的等同要素进行替换。

100

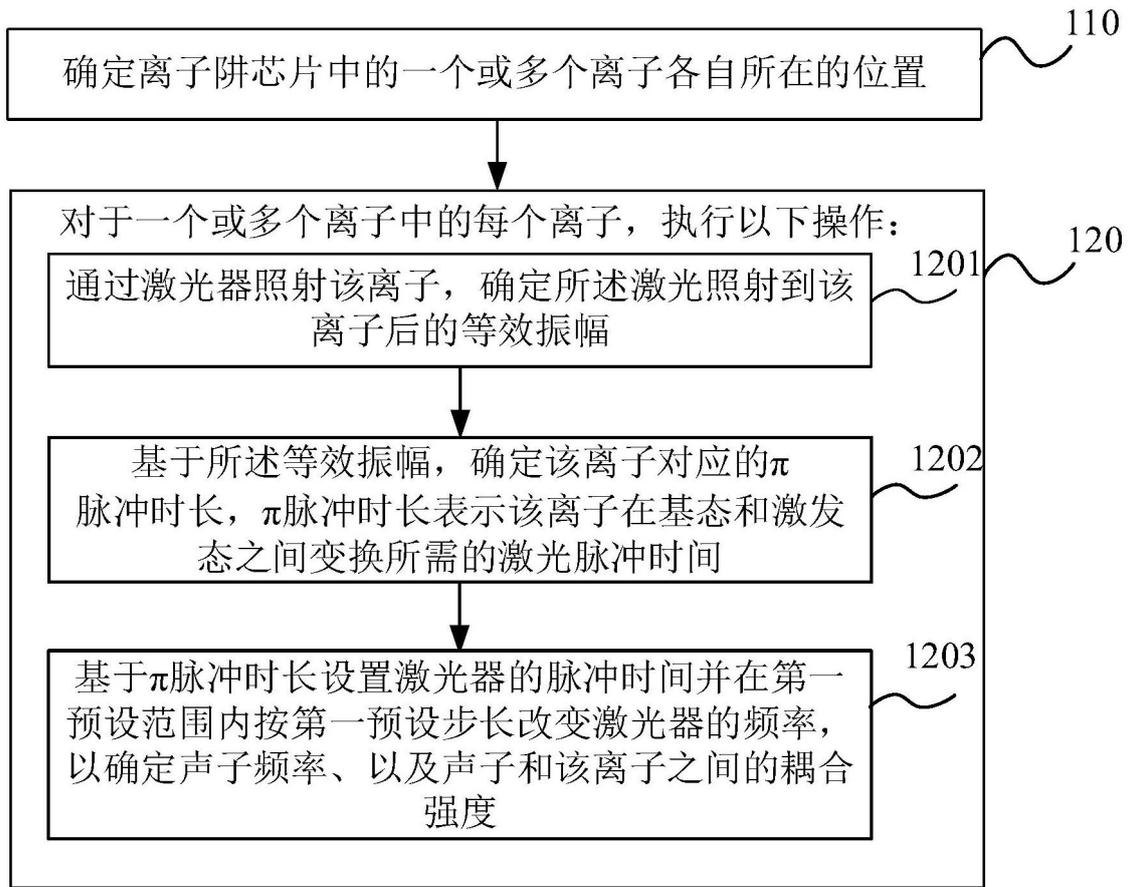


图1

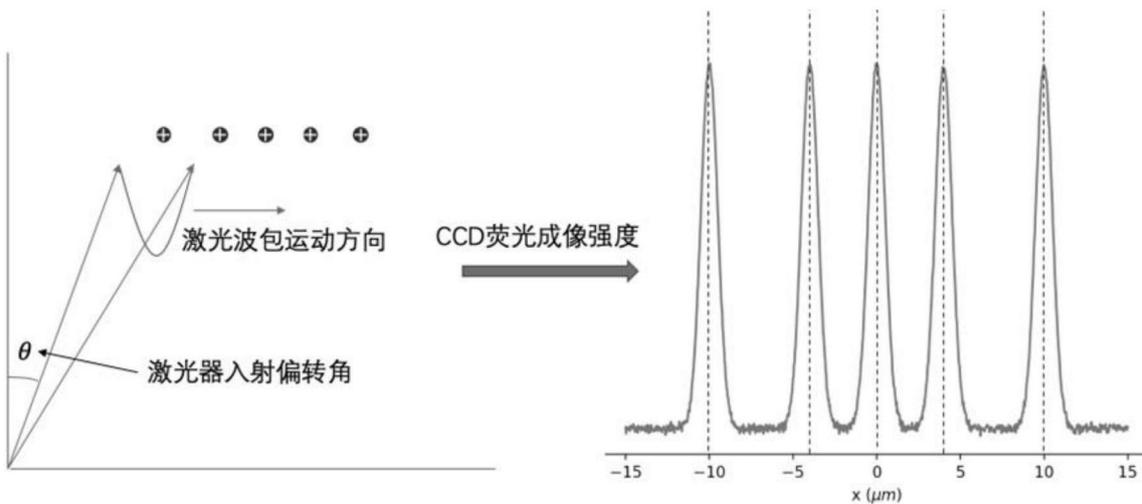


图2

1201

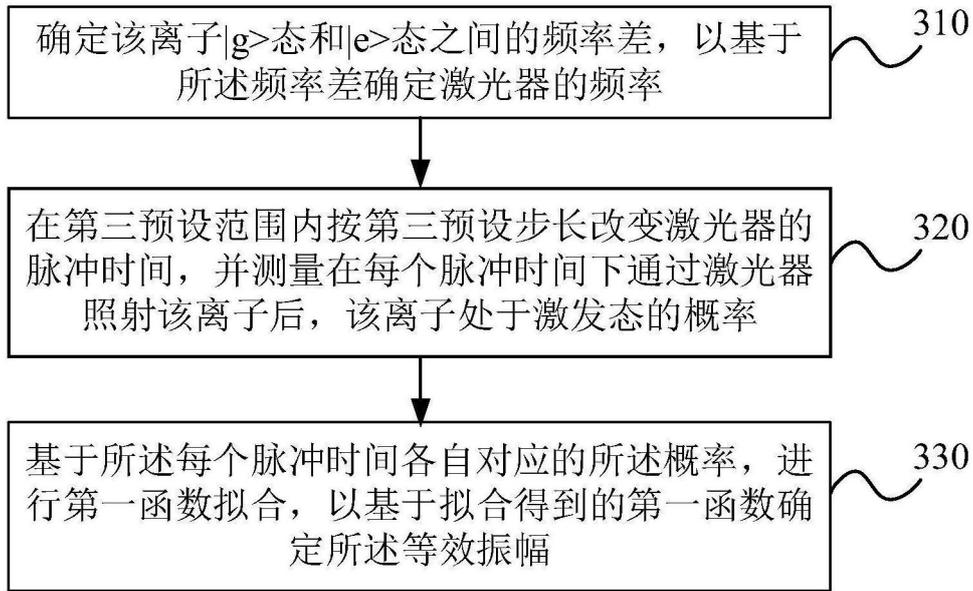


图3

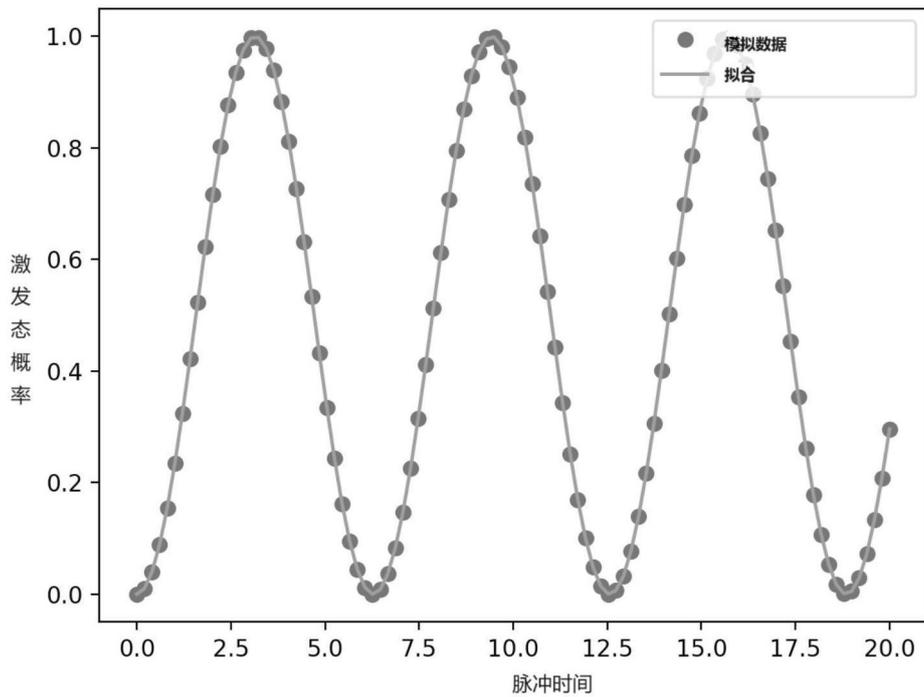


图4

1203

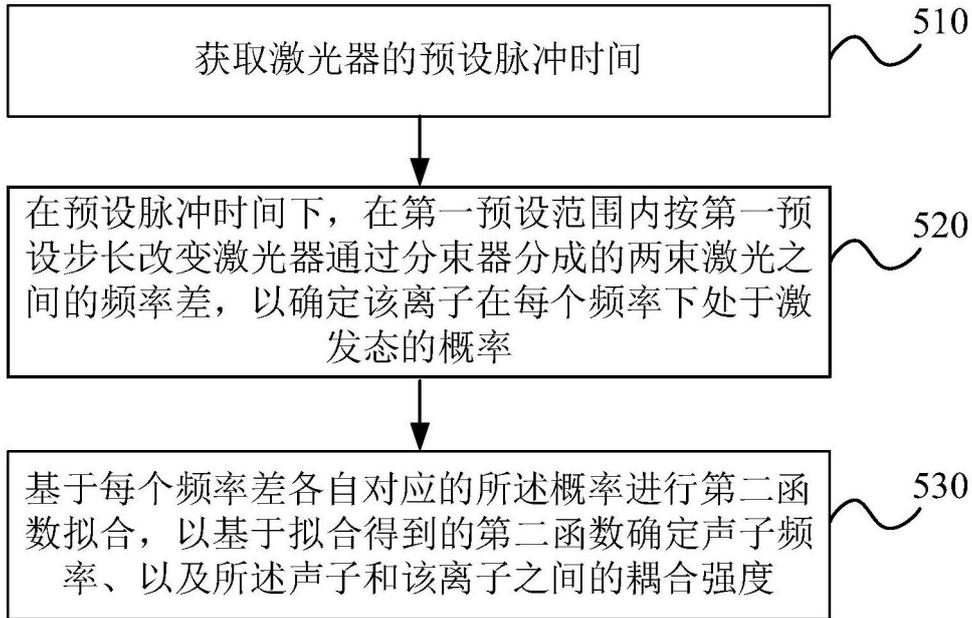


图5

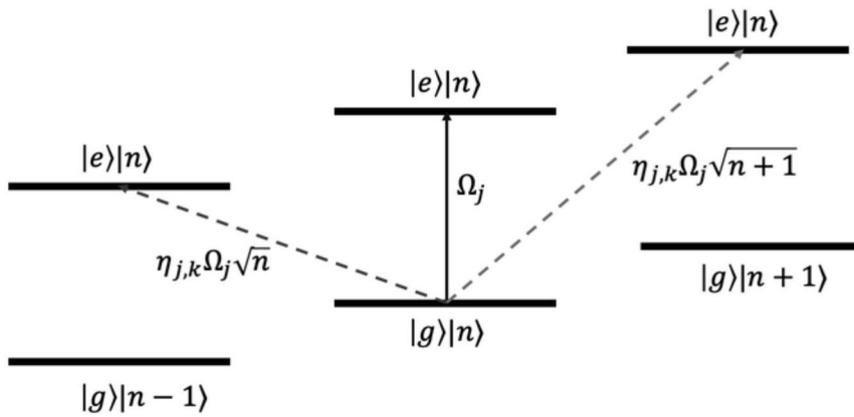


图6

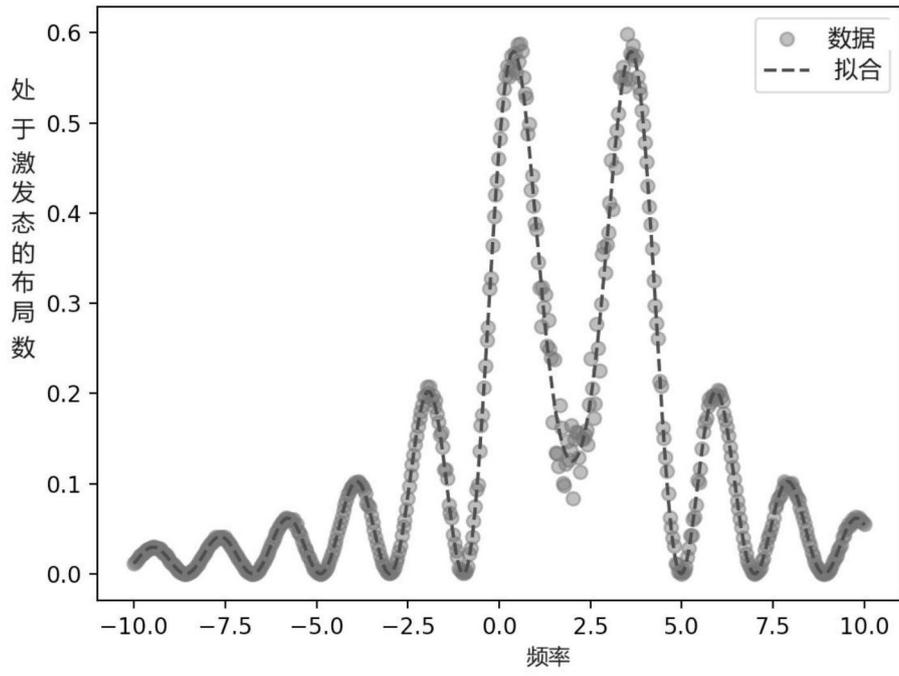


图7

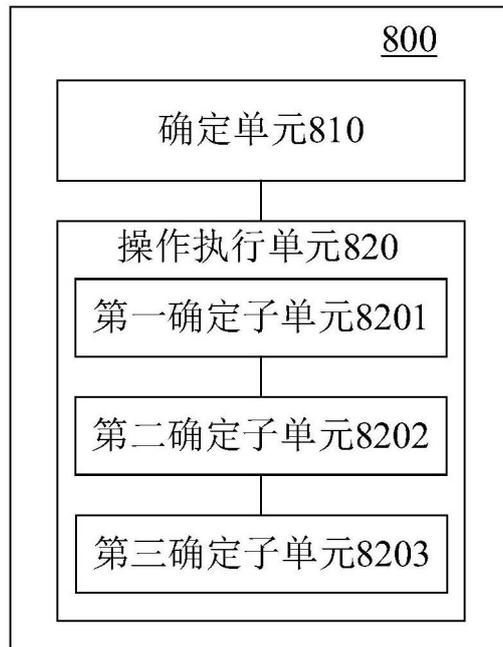


图8

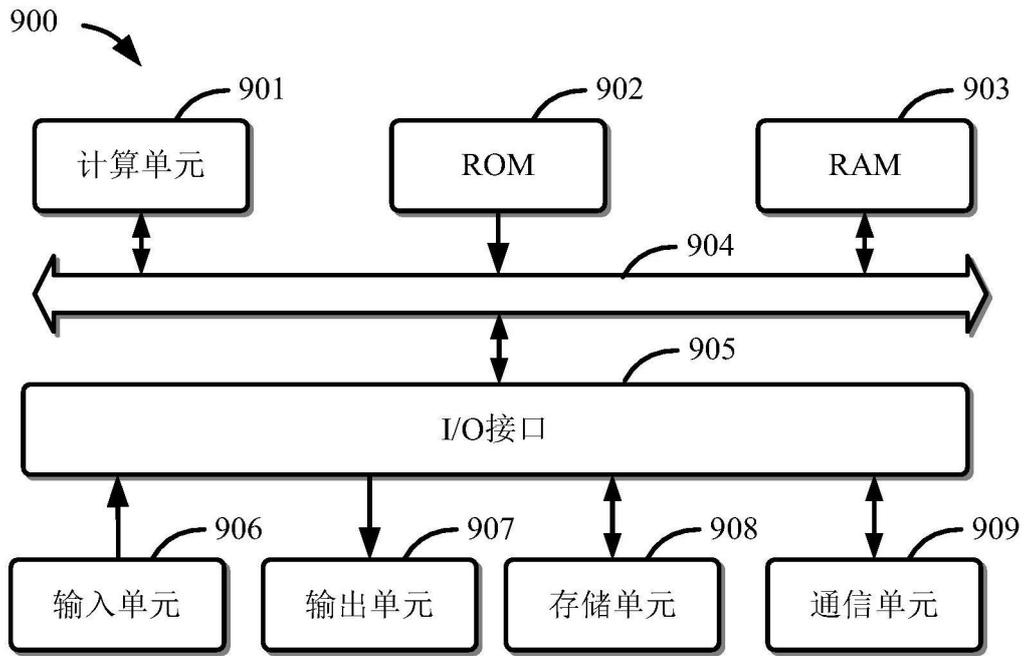


图9