



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117454997 B

(45) 授权公告日 2025.02.11

(21) 申请号 202311444852.5

G06F 17/10 (2006.01)

(22) 申请日 2023.11.01

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 101578684 A, 2009.11.11

申请公布号 CN 117454997 A

CN 104362069 A, 2015.02.18

(43) 申请公布日 2024.01.26

审查员 刘娟娟

(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

(72) 发明人 黄晨 汪景波

(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 10/20 (2022.01)

G06N 10/40 (2022.01)

权利要求书3页 说明书11页 附图5页

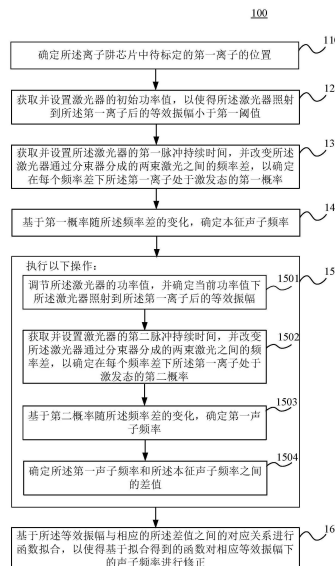
(54) 发明名称

离子阱芯片参数修正方法及装置、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修正方法、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:确定离子阱芯片中第一离子的本征声子频率;执行以下操作多次:调节激光器的功率值并确定当前功率值下激光器照射到第一离子后的等效振幅;获取并设置激光器的第二脉冲持续时间,改变激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差,以确定每个频率差下第一离子处于激发态的第二概率;基于第二概率随频率差的变化确定第一声子频率;确定第一声子频率和本征声子频率之间的差值;以及基于等效振幅与相应差值的对应关系进行函数拟合,以基于拟合函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。

CN 117454997 B



1. 一种离子阱芯片参数修正方法,包括:
 - 确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置;
 - 获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值;
 - 获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率;
 - 基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率;
 - 执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数:
 - 调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅;
 - 获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率;
 - 基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率;
 - 确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值;以及基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。
2. 如权利要求1所述的方法,其中,获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值包括:
 - 调节所述激光器的功率值,直到所确定的所述等效振幅小于第一阈值并将所述等效振幅小于第一阈值时所对应的所述功率值确定为初始功率值;
 - 确定所述第一离子 $|g\rangle$ 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通过分束器分成的两束激光之间的频率差;
 - 调节所述激光器的脉冲持续时间,并确定在每个脉冲持续时间下通过所述激光器照射所述第一离子后,所述第一离子处于激发态的概率;
 - 确定所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的第三脉冲持续时间;以及基于所述第三脉冲持续时间确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。
3. 如权利要求1所述的方法,其中,所述第一脉冲持续时间大于所述第二脉冲持续时间。
4. 如权利要求1所述的方法,其中,所述第一阈值为0.01MHz。
5. 如权利要求1所述的方法,其中,确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置包括:在第一预设范围内按第一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所述第一离子的位置。
6. 如权利要求1所述的方法,还包括:确定所述第一离子所对应的量子系统的哈密顿量表示式,以基于所述哈密顿量表示式确定所述第一离子处于激发态的各个概率,
 - 其中,所述哈密顿量表示式包括蓝边带跃迁所对应的项、红边带跃迁所对应的项、以及主跃迁所对应的项。
7. 如权利要求1所述的方法,其中,确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅包括:
 - 确定所述第一离子 $|g\rangle$ 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通

过分束器分成的两束激光之间的频率差；

调节所述激光器的脉冲持续时间,并确定在每个脉冲持续时间下通过所述激光器照射所述第一离子后,所述第一离子处于激发态的概率；

确定所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的第四脉冲持续时间；以及基于所述第四脉冲持续时间确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

8.如权利要求7所述的方法,其中,获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间包括:将所述第二脉冲持续时间设置等于所述第四脉冲持续时间或者在预设的误差范围内接近于所述第四脉冲持续时间。

9.如权利要求2或7所述的方法,其中,基于以下公式确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅 Ω ：

$$\Omega = \pi/2\tau$$

其中, τ 为所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的相应的脉冲持续时间。

10.一种离子阱芯片参数修正装置,包括：

第一确定单元,配置为确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置；

获取单元,配置为获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值；

第二确定单元,配置为获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率；

第三确定单元,配置为基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率；

执行单元,配置为执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数：

调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅；

获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率；

基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率；

确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值；以及修正单元,配置为基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。

11.如权利要求10所述的装置,其中,所述获取单元包括调节子单元,配置为:调节所述激光器的功率值,直到所确定的所述等效振幅小于第一阈值并将所述等效振幅小于第一阈值时所对应的所述功率值确定为初始功率值：

确定所述第一离子 $|g\rangle$ 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通过分束器分成的两束激光之间的频率差；

调节所述激光器的脉冲持续时间,并确定在每个脉冲持续时间下通过所述激光器照射所述第一离子后,所述第一离子处于激发态的概率；

确定所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的第三脉冲持续时间；以及基于所述第三脉冲持续时间确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

12.如权利要求10所述的装置,其中,所述第一脉冲持续时间大于所述第二脉冲持续时

间。

13. 如权利要求10所述的装置,其中,所述第一阈值为0.01MHz。

14. 如权利要求10所述的装置,其中,所述第一确定单元包括确定子单元,配置为:在第一预设范围内按第一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所述第一离子的位置。

15. 如权利要求10所述的装置,还包括第四确定单元,配置为:

确定所述第一离子所对应的量子系统的哈密顿量表示式,以基于所述哈密顿量表示式确定所述第一离子处于激发态的各个概率,

其中,所述哈密顿量表示式包括蓝边带跃迁所对应的项、红边带跃迁所对应的项、以及主跃迁所对应的项。

16. 如权利要求11所述的装置,其中,基于以下公式确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅 Ω :

$$\Omega = \pi / 2\tau$$

其中, τ 为所述第三脉冲持续时间。

17. 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1-9中任一项所述的方法。

18. 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1-9中任一项所述的方法。

19. 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1-9中任一项所述的方法。

离子阱芯片参数修正方法及装置、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修正方法、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量子力学的计算方法,其原理是利用离子在电场中的稳定运动,将它们作为量子比特进行信息处理,通过激光与微波场的精确调控,能够实现量子门操作,从而进行量子计算。该方法目前被认为是实现量子计算的有望途径之一。

[0003] 离子阱量子计算的基本过程是利用激光来冷却离子,并通过直流和交变的电场在空间形成束缚势,使离子可以静止在三维空间中的一个点上,然后通过调节激光来实现离子之间的量子纠缠和操作。由于每个离子可以抽象为一个量子比特,因此可以通过对它们的操作来实现量子计算中的诸多重要任务,例如量子随机漫步、量子模拟以及量子搜索等。离子阱量子计算具有高度的可控性,可以实现高效的量子算法,具有广泛的应用前景。与此同时,离子阱量子计算对试验技术的要求非常高,需要精确控制离子的位置、能级和相互作用,还需要对离子进行高精度的测量和控制。

发明内容

[0004] 本公开提供了一种离子阱芯片参数修正方法、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修正方法,包括:确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置;获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值;获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率;基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率;执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数:调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅;获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率;基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率;确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值;以及基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。

[0006] 根据本公开的另一方面,提供了一种离子阱芯片参数修正装置,包括:第一确定单元,配置为确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置;获取单元,配置为获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值;第二确定单元,配置为获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发

态的第一概率;第三确定单元,配置为基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率;执行单元,配置为执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数:调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅;获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率;基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率;确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值;以及修正单元,配置为基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。

[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,将等效振幅和声子频率进行关联标定,并拟合出相应的等效振幅与差值之间的关系,从而后续可以基于该差值进行相关声子频率进行修正,使得声子频率标定精确度更高,使得修正后的声子频率可以更好地适用于离子阱实验,为实验结果的准确性提供了保障。

[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修正方法的流程图;

[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离子和声子耦合后可能的跃迁示意图;

[0016] 图4示出了根据本公开的实施例的对蓝边带跃迁扫频结果以及基线模型理论拟合结果的示意图;

[0017] 图5示出了根据本公开的实施例的基于扫频实验确定声子频率的示意图;

[0018] 图6示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数修正装置的结构框图;以及

[0019] 图7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

[0020] 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。

[0021] 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。

[0022] 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。

[0023] 下面将结合附图详细描述本公开的实施例。

[0024] 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。

[0025] 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。

[0026] 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。

[0027] 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。

[0028] 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,获得更精确的量子门,从而基于所获得的量子门实现更精确的量子计算操作。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。

[0029] 在这些待标定的参数中,离子阱的集体振动模式——声子频率显得尤为重要。这是因为离子阱量子计算中,生成双比特以及多比特的量子门都需要对离子进行精确的操作和控制,而且在量子电路每次运行完毕后,都需要通过声子进行冷却重置工作,这些都离不开对声子频率的标定。

[0030] 理论上,离子阱中离子集体振动对应的声子频率是有限制的。声子频率的限制是由于离子间的库仑相互作用和各个离子在稳态下的位置之间的相互作用引起的。这些相互作用使得离子的集体振动形成了一些特定的频率模式,这些频率模式可以通过精确控制激光的频率和功率来激发和调整。因此,离子阱中离子的集体振动对应的声子频率的值可以用来精确控制离子的位置和动量。离子阱量子计算中的操作常常要求精确控制离子之间的相互作用和离子的位置,因此需要精确调控离子阱中的声子频率。如果声子频率标定有误差,离子之间的相互作用将会导致计算中的误差和噪声,从而影响整个计算的精度和可靠性。因此,声子频率的准确值是离子阱量子计算中确保高效、准确的关键之一。

[0031] 离子阱实验中,需要对搭建好的离子阱系统进行标定。较为精确的方法是Ramsey干涉法。Ramsey干涉法是一种基于量子干涉的测量方法,通过调整自由演化时间,观察干涉条纹的周期性变化,可以测量原子或离子的内部能级之间的能量差。在离子阱实验中,可以用Ramsey干涉法来测量离子的声子频率。具体操作方法是:将一个原子或离子从一个能级制备到另一个能级,然后让它自由演化一段时间,最后再将它转回制备态。如果两个离子处于相同的能级,那么它们会发生干涉,产生干涉条纹;如果两个离子处于不同的能级,那么它们不会发生干涉,不会产生干涉条纹。通过调整自由演化时间,可以观察到干涉条纹的周期性变化。根据干涉条纹的周期,可以计算出离子的声子频率。

[0032] 但是,Ramsey干涉法的灵敏度受到自由演化时间的限制。较短的自由演化时间会导致干涉条纹的可见度下降,而较长的自由演化时间则会导致干涉条纹的周期性变化变得不明显。Ramsey干涉法需要高精度的激光和控制系统以及稳定的环境条件,才能获得高精度的声子频率标定结果。环境噪声或温度变化等因素都可能对实验结果产生影响。Ramsey干涉法需要进行多次实验来确定声子频率,这增加了实验的复杂性和耗时。此外,Ramsey干涉法还需要离子阱具有高质量因子和较长的寿命,以保证干涉条纹的稳定性。这对离子阱的制备和调整都提出了一定的要求。

[0033] 因此,根据本公开的实施例提供了一种离子阱芯片参数修正方法。图1示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数修正方法的流程图,如图1所示,方法100包括:确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置(步骤110);获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值(步骤120);获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率(步骤130);基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率(步骤140);执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数(步骤150):调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所

述第一离子后的等效振幅(步骤1501);获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率(步骤1502);基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率(步骤1503);确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值(步骤1504);以及基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正(步骤160)。

[0034] 根据本公开的实施例,将等效振幅和声子频率进行关联标定,并拟合出相应的等效振幅与差值之间的关系,从而后续可以基于该差值进行相关声子频率进行修正,使得声子频率标定精确度更高,使得修正后的声子频率可以更好地适用于离子阱实验,提高了实验结果的准确性。

[0035] 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10~100 μm 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2~10 μm 。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。

[0036] 在一些实施例中,确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置包括:在第一预设范围内按第一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所述第一离子的位置。

[0037] 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。

[0038] 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。

[0039] 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。

[0040] 在一些实施例中,获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值包括:调节所述激光器的功率值,直到所确定的所述等效振幅小于第一阈值并将所述等效振幅小于第一阈值时所对应的所述功率值确定为初始功率值;确定所述第一离子 $|g\rangle$ 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通过分束器分成的两束激光之间的频率差;调节所述激光器的脉冲持续时间,并确定在每个脉冲持续时间下通过所述激光器照射所述第一离子后,所述第一离子处于激发态的概率;确定所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的第三脉冲持续时间;以及基于所述第三脉冲持续时间确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

[0041] 根据一些实施例,基于以下公式确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅 Ω :

[0042] $\Omega = \pi/2\tau$

[0043] 其中, τ 为所述第三脉冲持续时间。

[0044] 在一些示例中, 在确定好第一离子的位置后, 可以将两束对射的激光的频率差调制到与第一离子内态 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差相同, 通过不断改变激光作用的脉冲持续时间 τ , 观察第一离子在 $|e\rangle$ 态 (激发态) 的布局数随着时间的变化, 直到在经过激光脉冲持续时间 τ 时, 第一离子在 $|e\rangle$ 态上的概率接近 1。通过此方式, 可以标定出激光照射到所述第一离子后的等效振幅 (即 Rabi 驱动强度) 为 $\Omega = \pi/2\tau$ 。

[0045] 根据一些实施例, 所述第一阈值包括 0.01MHz。

[0046] 可以理解的是, 可以根据具体离子阱芯片或实际需求设置相应的第一阈值, 以在等效振幅小于该阈值时可以默认该激光难以使第一离子与声子之间产生耦合、其声子频率接近于其本征频率。

[0047] 根据一些实施例, 所述第一脉冲持续时间大于所述第二脉冲持续时间。

[0048] 由上面所述可以看出, 等效振幅 (即 Rabi 驱动强度) 与激光脉冲持续时间成反比。因此, 在等效振幅较小时, 可以选取一个较长的脉冲持续时间 τ , 以改变激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差, 确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率, 进而确定本征声子频率。

[0049] 由于 Ramsey 干涉法操作较为繁琐、时间消耗较大等问题, 在根据本公开实施例中, 通过采用激光扫频法来测量离子的声子频率。具体地, 通过激光扫频器调节激励信号 (即两束激光之间的频率差) 的频率, 观察离子荧光的变化, 可以得到离子处于激发态的布局数。

[0050] 在通过扫频实验确定声子频率的示例中, 激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差在接近声子频率时, 会出现一个明显的波峰。因此, 可以确定第一概率出现波峰时所对应的频率差, 作为相应的声子频率。

[0051] 类似地, 根据一些实施例, 确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅包括: 确定所述第一离子 $|g\rangle$ 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通过分束器分成的两束激光之间的频率差; 调节所述激光器的脉冲持续时间, 并确定在每个脉冲持续时间下通过所述激光器照射所述第一离子后, 所述第一离子处于激发态的概率; 确定所述第一离子处于激发态的概率接近于 1 时所对应的第四脉冲持续时间; 以及基于所述第四脉冲持续时间确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

[0052] 根据一些实施例, 基于以下公式确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅 Ω :

[0053] $\Omega = \pi/2\tau$

[0054] 这里, τ 为所述第四脉冲持续时间。

[0055] 根据一些实施例, 获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间包括: 将所述第二脉冲持续时间设置等于为所述第四脉冲持续时间或者在预设的误差范围内接近于所述第四脉冲持续时间。

[0056] 在一些实施例中, 在标定完一个离子 (即第一离子) 后, 即可改变激光器入射角度以寻址下一个待标定的第一离子, 重复相应的标定流程, 完成下一个离子的等效振幅与相应的声子频率差之间的函数关系, 直到所有离子均标定完成。

[0057] 在一些示例中, 在获得拟合得到的所述等效振幅与相应的所述差值之间的函数关

系后,即可基于该函数关系对相同或相似离子阱芯片中的相应离子所对应的量子频率进行修正。例如,在一些实验中,需要用到本征声子频率,但是用户所标定的声子频率并非为其本征频率。由于在离子阱芯片参数标定中,通常均需要标定出等效振幅并在此基础上进一步标定出该声子频率,因此可以根据用户所标定的等效振幅以及根据本公开实施例所获得的该函数关系,确定用户所标定的等效振幅所对应的频率差,再由用户所标定的声子频率减去该频率差即可获得相应的本征频率。又例如,厂商给定了相应的声子频率,但是在用户实验中,由于所使用的激光器功率、相位、振幅等影响,其实际声子频率与该给定的声子频率出现一定差异。因此,即可根据用户实验中所标定的等效振幅以及根据本公开实施例所获得的该函数关系,确定用户所标定的等效振幅所对应的频率差,再由该给定的声子频率加上该频率差即可获得当前用户实验中的实际声子频率。

[0058] 可以理解的是,上述基于该函数关系对相同或相似离子阱芯片中的相应离子所对应的量子频率进行修正仅为示例性的。在真实的物理实验中,用户可以根据其实验需求、基于该函数关系获得相应等效振幅下的更准确的声子频率,在此不做限制。

[0059] 在一些扫频实验中,在基于离子处于激发态的布局数(即概率)确定声子频率时,通常将观测得到的第一蓝边带跃迁峰值对应的频率(即激光器通过分束器分成的两束激光之间的频率差)与主跃迁峰值对应的频率之差视为声子频率。但是,此时只考虑了蓝边带跃迁,而忽略了主跃迁和红边带跃迁对结果的影响;并且,只考虑了二能级系统,即 $|g\rangle|n\rangle$ 和 $|g\rangle|n+1\rangle$,而实际离子阱系统具有多个能级。

[0060] 因此,在一些实施例中,根据本公开的方法还包括:确定所述第一离子所对应的量子系统的哈密顿量表示式,以基于所述哈密顿量表示式确定所述第一离子处于激发态的各个概率。所述哈密顿量表示式包括蓝边带跃迁所对应的项、红边带跃迁所对应的项、以及主跃迁所对应的项。

[0061] 如上所述,通常采用直接读取第一蓝边带跃迁频率与主跃迁频率的差值作为声子频率。但实际情况是,只考虑了蓝边带跃迁,而忽略了主跃迁和红边带跃迁的存在,因此标定的声子频率和实际值会产生一个偏差。

[0062] 而在根据本公开的实施例中,同时考虑了三种跃迁的影响,其对应的完整哈密顿量如下:

$$[0063] \quad H_{I,j,k} = \Omega_j \sigma_j^+ e^{-i(\omega_j - \omega_j^{qbt})t} \exp[i\eta_{j,k}(a_k e^{-i\omega_k t} + a_k^+ e^{i\omega_k t})] + h.c$$

[0064] 其中,j,k分别为离子和声子指标, Ω_j 是等效的Rabi驱动频率(即等效振幅), σ_j^+ 是第j个离子从 $|g\rangle$ 转移到 $|e\rangle$ 态的升算符, $\Delta_j = \omega_j - \omega_j^{qbt}$ 代表激光器通过分束器分成的两束激光的大失谐,即两束激光之间的频率差,一般也是扫频实验中可以操控的变量。 $\eta_{j,k}$ 是离子和声子之间耦合的强度、 a_k 是声子的湮灭算符、 ω_k 是声子的频率、也是主要待标定的对象、 $h.c$ 代表共轭项。

[0065] 如上哈密顿量在 $\eta_{j,k}$ 较小时,可以展开表示成如下形式:

$$[0066] \quad H_{I,j,k} = \Omega_j \sigma_j^+ e^{-i(\omega_j - \omega_j^{qbt})t} [1 + i\eta_{j,k}(a_k e^{-i\omega_k t} + a_k^+ e^{i\omega_k t})] + h.c$$

[0067] 当 $\Delta_j = 0$ 时,人们一般忽略后面的高频项,哈密顿量只剩 $\Omega_j \sigma_j^+ + h.c$ 项,称之为

主跃迁。当 $\Delta_j \approx \omega_k$ 时,哈密顿量近似只剩 $\Omega_j \sigma_j^+ a_k^+ + h.c$ 项,称之为蓝边带跃迁。当 $\Delta_j \approx -\omega_k$ 时,哈密顿量近似只剩 $\Omega_j \sigma_j^+ a_k + h.c$ 项,称之为红边带跃迁。如上三种跃迁一般是人们目前考虑到的所有项。其对应的跃迁示意图如图3所示。

[0068] 在只考虑蓝边带跃迁时,激光与二能级系统的相互作用哈密顿量经过t时间的演化后,离子在 $|e\rangle$ 态上的概率可以方便地基于相应的哈密顿量计算得到:

$$[0069] \quad P_e(\Delta, t) = \frac{\eta^2 \Omega_{j,k}^2}{\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta - \omega_k)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\eta^2 \Omega_{j,k}^2 + (\Delta - \omega_k)^2} t \right)$$

[0070] 其中,扫频的结果与实际情况存在偏差,称之为“频率漂移”,如图4所示。

[0071] 而在上述实施例中,所使用的哈密顿量表示式考虑到了三种跃迁,因此基于该哈密顿量可以计算处于激发态的布局数随着激光频率差的变化。需要说明的是,用于观测离子处于激发态的布局数(概率)的设备(如荧光检测设备)可以方便地获得。在模拟实验中,可以基于所确定的哈密顿量计算得到在不同激光参数下离子处于激发态的布局数变化。因此,通过计算激发态布局数随着频率的变化,其中可以记录主红蓝 $|e\rangle|n\rangle$ 、 $|e\rangle|n-1\rangle$ 、 $|e\rangle|n+1\rangle$ 三种布局数和总的 $|e\rangle$ 态布局数,如图5所示。

[0072] 如上所述,在上述通过扫频实验确定声子频率的示例中,可以确定第一概率出现波峰时所对应的频率差,作为相应的声子频率。而在如图5所示的示例中,则第一概率出现波峰时一般对应于蓝边带跃迁所对应的峰值。因此,可以读取频率差大于0区域中的波峰(即蓝边带跃迁所对应的峰值)所对应的频率差,作为相应的声子频率。

[0073] 在上述实施例中,哈密顿量表达式中保留了主跃迁、红跃迁、蓝跃迁的影响,其标定的结果更加符合真实的实验情形,标定出的参数更加切近真实实验参数。

[0074] 根据本公开的实施例,如图6所示,还提供了一种离子阱芯片参数修正装置600,包括:第一确定单元610,配置为确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置;获取单元620,配置为获取并设置激光器的初始功率值,以使得所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅小于第一阈值;第二确定单元630,配置为获取并设置所述激光器的第一脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第一概率;第三确定单元640,配置为基于所述第一概率随所述频率差的变化,确定本征声子频率;执行单元650,配置为执行以下操作N次,N为大于等于2的正整数:调节所述激光器的功率值,并确定当前功率值下所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅;获取并设置所述激光器的第二脉冲持续时间,并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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率;以及基于所述第二概率随所述频率差的变化,确定第一声子频率;确定所述第一声子频率和所述本征声子频率之间的差值;以及修正单元660,配置为基于所述等效振幅与相应的所述差值之间的对应关系进行函数拟合,以使得基于拟合得到的函数对相应等效振幅下的声子频率进行修正。

[0075] 这里,离子阱芯片参数修正装置600的上述各单元610~660的操作分别与前面描述的步骤110~160的操作类似,在此不再赘述。

[0076] 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。

[0077] 参考图7,现将描述可以作为本公开的服务器或客户端的电子设备700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。

[0078] 如图7所示,电子设备700包括计算单元701,其可以根据存储在只读存储器 (ROM) 702中的计算机程序或者从存储单元708加载到随机访问存储器 (RAM) 703中的计算机程序,来执行各种适当的动作和处理。在RAM 703中,还可存储电子设备700操作所需的各种程序和数据。计算单元701、ROM 702以及RAM 703通过总线704彼此相连。输入/输出 (I/O) 接口705也连接至总线704。

[0079] 电子设备700中的多个部件连接至I/O接口705,包括:输入单元706、输出单元707、存储单元708以及通信单元709。输入单元706可以是能向电子设备700输入信息的任何类型的设备,输入单元706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707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708可以包括但不限于磁盘、光盘。通信单元709允许电子设备700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。

[0080] 计算单元701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701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701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708。在一些实施例中,计算机程序的部分或者全部可以经由ROM 702和/或通信单元709而被载入和/或安装到电子设备700上。当计算机程序加载到RAM 703并由计算单元701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701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。

[0081] 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。

[0082] 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。

[0083] 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。

[0084] 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。

[0085] 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。

[0086] 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。

[0087] 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。

[0088] 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。

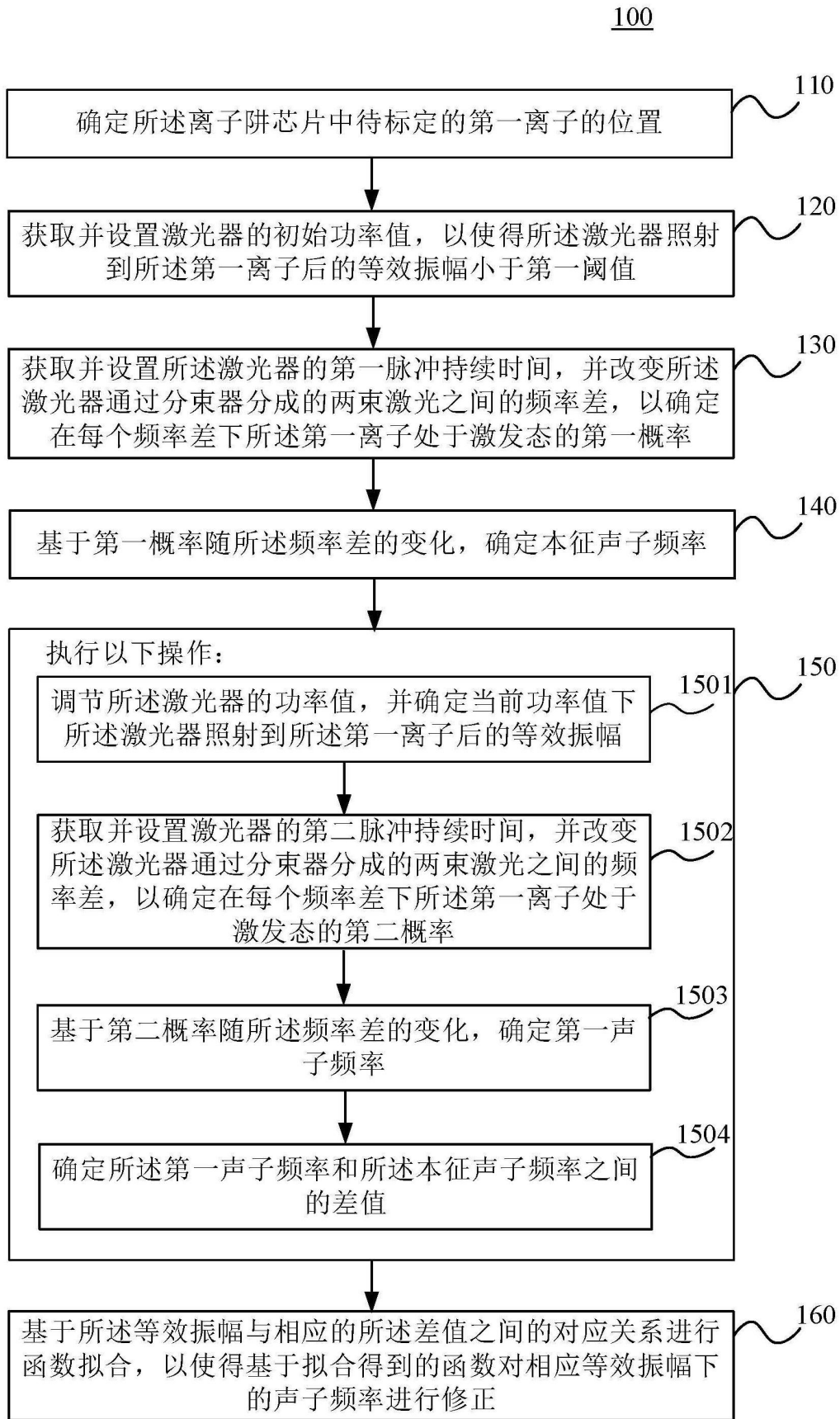


图1

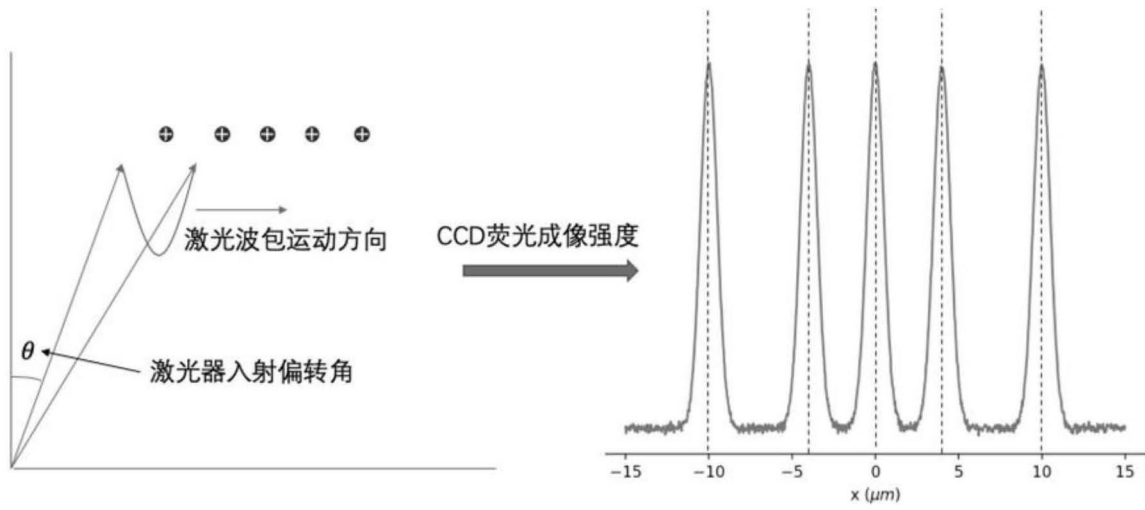


图2

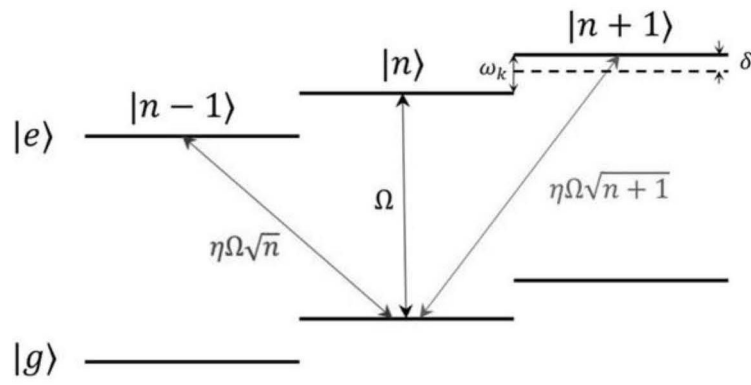


图3

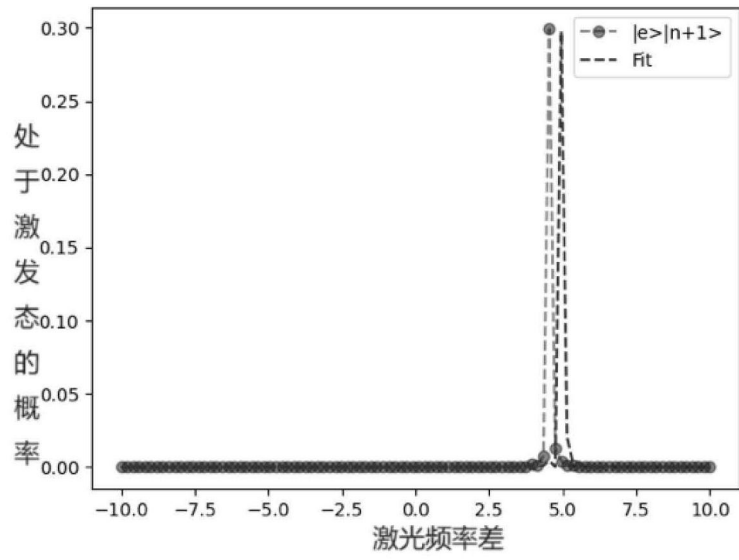


图4

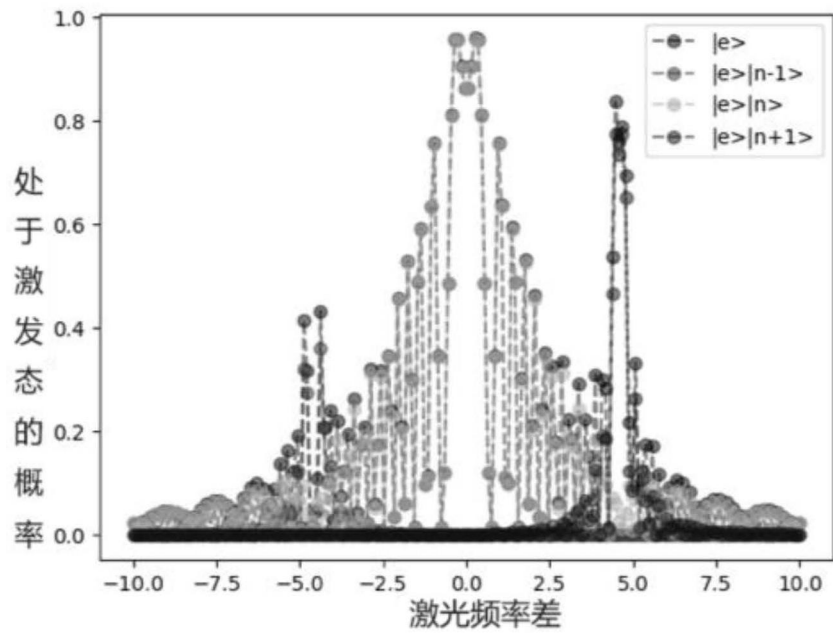


图5

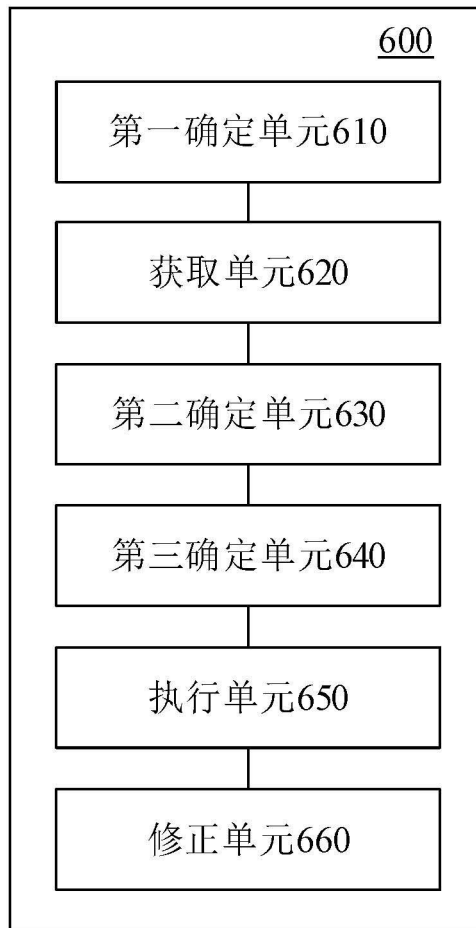


图6

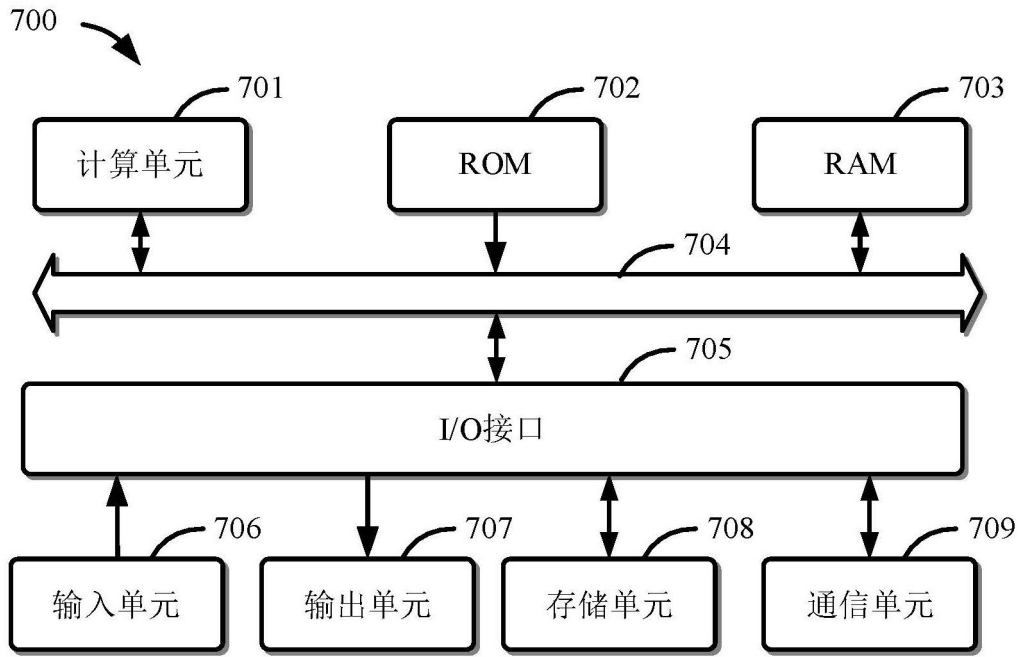


图7