



(21) 申请号 202311443801.0

G06F 17/10 (2006.01)

(22) 申请日 2023.11.01

H01L 29/66 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117371547 A

(56) 对比文件

CN 113592092 A, 2021.11.02

CN 113874885 A, 2021.12.31

(43) 申请公布日 2024.01.09

审查员 刘晴晴

(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 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 10/20 (2022.01)

G06N 10/40 (2022.01)

权利要求书3页 说明书11页 附图6页

(54) 发明名称

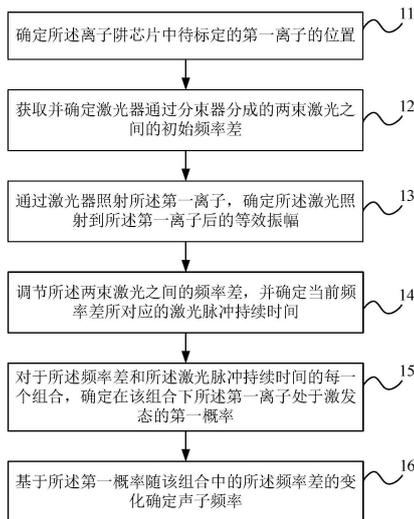
离子阱芯片参数确定方法及装置、电子设备和介质

(57) 摘要

本公开提供了一种离子阱芯片参数确定方法、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:确定离子阱芯片中待标定的第一离子的位置;获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差;确定激光照射到第一离子后的等效振幅;调节两束激光之间的频率差并确定所对应的激光脉冲持续时间;对于频率差和激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合下第一离子处于激发态的第一概率;基于第一概率随该组合中的频率差的变化确定声子频率。基于公式

$$\tau_{\text{opt}} = n\pi / \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$$
 确定激光脉冲持续时间 τ_{opt} , n 为奇数, Ω 为等效振幅, Δ 为频率差。

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待标定的第一离子的位置;

获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差;

通过激光器照射所述第一离子,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅;

调节所述两束激光之间的频率差,并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间,其中,基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi/\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,其中n为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差;

对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合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该组合中的所述频率差的变化确定声子频率。

2. 如权利要求1所述的方法,还包括:

在第一预设范围内按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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率,其中所述第一预设范围内的频率差在预设范围内接近于所述声子频率;

基于所述第二概率随所述频率差的变化进行函数拟合,以基于拟合结果确定所述第一离子与相应声子之间的耦合强度,其中,基于以下公式进行函数拟合:

$$P_e(\Delta, \tau) = \frac{\eta^2 \Omega^2}{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \sin^2(\sqrt{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \tau)$$

其中, $P_e(\Delta, \tau)$ 为所述第一离子处于激发态的第二概率, η 为所述第一离子与相应声子之间的耦合强度, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差, ω 为所述声子频率, τ 为与所述声子频率所对应所述频率差所对应的所述激光脉冲持续时间。

3. 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所述第一离子的位置。

4. 如权利要求1所述的方法,其中,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅包括:

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第三概率;

确定所述第一离子处于激发态的第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间;以及

基于所述第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间,确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

5. 如权利要求4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时所对应的相应的激光脉冲持续时间。

6. 如权利要求1-5中任一项所述的方法,其中,基于所述第一离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的

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初始频率差。

7. 一种离子阱芯片参数标定装置,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,配置为获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差;

第二确定单元,配置为通过激光器照射所述第一离子,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅;

第一调节单元,配置为调节所述两束激光之间的频率差,并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间,其中,基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi/\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,其中 n 为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差;

第三确定单元,配置为对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合下所述第一离子处于激发态的第一概率;

第四确定单元,配置为基于所述第一概率随该组合中的所述频率差的变化确定声子频率。

8. 如权利要求7所述的装置,还包括:

第二调节单元,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,其中所述第一预设范围内的频率差在预设范围内接近于所述声子频率;

第五确定单元,配置为基于所述第二概率随所述频率差的变化进行函数拟合,以基于拟合结果确定所述第一离子与相应声子之间的耦合强度,其中,基于以下公式进行函数拟合:

$$P_e(\Delta, \tau) = \frac{\eta^2 \Omega^2}{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \sin^2(\sqrt{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \tau)$$

其中, $P_e(\Delta, \tau)$ 为所述第一离子处于激发态的第二概率, η 为所述第一离子与相应声子之间的耦合强度, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差, ω 为所述声子频率, τ 为与所述声子频率所对应所述频率差所对应的所述激光脉冲持续时间。

9. 如权利要求7所述的装置,其中,所述第一确定单元包括: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所述第一离子的位置的单元。

10. 如权利要求7所述的装置,其中,所述第二确定单元包括:

用于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第三概率的单元;

用于确定所述第一离子处于激发态的第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间的单元;以及

用于基于所述第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间、确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅的单元。

11. 如权利要求10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 为所述第一离子处于激发态的概率接近于1时所对应的相应的激光脉冲持续时间。

12. 如权利要求7-11中任一项所述的装置,其中,基于所述第一离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差,确定所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差。

13. 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1-6中任一项所述的方法。

14. 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1-6中任一项所述的方法。

15. 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1-6中任一项所述的方法。

离子阱芯片参数确定方法及装置、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确定方法、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确定方法、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待标定的第一离子的位置;获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差;通过激光器照射所述第一离子,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅;调节所述两束激光之间的频率差,并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间,其中,基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi/\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,其中 n 为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差;对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合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该组合中的所述频率差的变化确定声子频率。

[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: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,配置为获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差;第二确定单元,配置为通过激光器照射所述第一离子,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅;第一调节单元,配置为调节所述两束激光之间的频率差,并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间,其中,基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi/\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,其中 n 为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差;第三确定单元,配置为对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合下所述第一离子处于激发态的第一概率;第四确定单元,配

置为基于所述第一概率随该组合中的所述频率差的变化确定声子频率。

[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;以及与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,采用动态时间调制的方式,即根据不同的频率差选取不同的激光脉冲持续时间,使得标定过程中本底噪声保持在较低水平的同时,提高了离子阱蓝边带跃迁的概率。这将显著提高离子标定过程的测量信号的信噪比,使得数据处理的精度更高,有助于提高标定过程的效率和准确性。

[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。本公开的其它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确定方法的流程图;

[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在固定脉冲时间时进行扫频实验所获得的布局数与激光频率差 Δ 之间的关系图;

[0016] 图4示出了根据本公开的实施例的在动态脉冲时间时进行扫频实验所获得的布局数与激光频率差 Δ 之间的关系图;

[0017] 图5示出了根据本公开的实施例的基于声子频率进行细致扫频确定耦合强度的示意图;

[0018] 图6示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数确定装置的结构框图;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] 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。

[0028] 因此,可以通过对离子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。

[0029] 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。在离子阱量子计算中,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。

[0030] 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。由于离子阱量子计算中涉及到的系统的非常细微的物理效应,如离子的振荡频率、频率噪声、离子阱稳定性等等,这些参数需要通过实验进行标定。这是因为离子阱量子计算的机制和操作需要在非常高的精度下工作,一些看起来轻微的误差实际上可能会对整个计算系统产生影响。

[0031] 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。

[0032] 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。

[0033] 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。

[0034] 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。

[0035] 因此,根据本公开的实施例提供了一种离子阱芯片参数确定方法。图1示出了根据本公开的实施例的离子阱芯片参数确定方法的流程图,如图1所示,方法100包括:确定所述离子阱芯片中待标定的第一离子的位置(步骤110);获取并确定激光器通过分束器分成的

两束激光之间的初始频率差(步骤120);通过激光器照射所述第一离子,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅(步骤130);调节所述两束激光之间的频率差,并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间,其中,基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi/\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,其中n为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差(步骤140);对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合,确定在该组合下所述第一离子处于激发态的第一概率(步骤150);基于所述第一概率随该组合中的所述频率差的变化确定声子频率(步骤160)。

[0036] 根据本公开的实施例,采用动态时间调制的方式,即根据不同的频率差选取不同的激光脉冲持续时间,使得标定过程中本底噪声保持在较低水平的同时,提高了离子阱蓝边带跃迁的概率。这将显著提高离子标定过程的测量信号的信噪比,使得数据处理的精度更高,有助于提高标定过程的效率和准确性。

[0037] 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。

[0038] 在离子阱量子计算中,人们在理论构建哈密顿量中,往往采用一定的近似手段去寻找合适的哈密顿量,以用于在扫频实验中,确定由声子频率引起的布局数的改变。在一些示例中,其对应的完整哈密顿量如下:

$$[0039] \quad H_{I,j,k} = \Omega_j \sigma_j^+ e^{-i(\omega_j - \omega_j^{qbt})t} \exp[i\eta_{j,k}(a_k e^{-i\omega_k t} + a_k^\dagger e^{i\omega_k t})] + h.c$$

[0040] 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。

[0041] 如上哈密顿量在 $\eta_{j,k}$ 较小时,可以展开表示成如下形式:

$$[0042] \quad H_{I,j,k} = \Omega_j \sigma_j^+ e^{-i(\omega_j - \omega_j^{qbt})t} [1 + i\eta_{j,k}(a_k e^{-i\omega_k t} + a_k^\dagger e^{i\omega_k t})] + h.c$$

[0043] 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 $\Omega_j \sigma_j^+ a_k^\dagger + h.c$ 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。

[0044] 在离子阱芯片中,重要实验参数的确定,一般离不开对声子频率进行扫描。示例地,要测量声子频率以及声子和离子的耦合强度,需要在扫频实验中找到量子态在末态 $|e\rangle$ 或 $|n+1\rangle$ 的布局数,并使得 $|e\rangle$ 或 $|n+1\rangle$ 尽可能的大,提高探测的信噪比。这里会遇到一个问题,虽然在模拟计算中可以很好的区分子量子态是出于 $|e\rangle$ 或 $|n+1\rangle$ 态还是出于 $|e\rangle$ 或 $|n\rangle$ 态,但在实际的测量过程中,通过荧光探测,一般只能探测到离子内态是出于 $|e\rangle$ 态还是 $|g\rangle$ 态,这里就需要

设计合理的方式,尽量降低量子系统在演化后末态 $|e\rangle|n\rangle$ 上的布局数,并且提高末态在 $|e\rangle|n+1\rangle$ 上的布局数。

[0045] 因此,在本公开的实施例中,设计了一种动态调整脉冲时间的方式,以在离子阱量子计算参数标定中,提高蓝边带跃迁的探测效率,显著提高离子标定过程的测量信号的信噪比。具体而言,首先,需要找到合适的脉冲时间 τ ,确保在一个脉冲时间内,其 $|e\rangle|n\rangle$ 态上的布局数低,而 $|e\rangle|n+1\rangle$ 态上的布局数最高。为了描述简单,可以假定只考虑单个离子和声子之间的相互作用,省去j,k指标,可以定义两者布局数的比值如公式(1)所示:

$$[0046] \quad SNR(\Delta, \tau) = \frac{P_{e,n+1}(\Delta, \tau)}{P_{e,n}(\Delta, \tau)} \quad (1)$$

[0047] 其中, $P_{e,n}(\Delta, \tau)$ 可以近似表示为公式(2)所示:

$$[0048] \quad P_{e,n}(\Delta, \tau) = \frac{\Omega^2}{\Omega^2 + \Delta^2} \sin^2(\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \tau) \quad (2)$$

[0049] $P_{e,n+1}(\Delta, \tau)$ 可以近似表示为公式(3)所示:

$$[0050] \quad P_{e,n+1}(\Delta, \tau) = \frac{\eta^2 \Omega^2}{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \sin^2(\sqrt{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \tau) \quad (3)$$

[0051] 在实验中, $P_{e,n}(\Delta, \tau)$ 不是我们想要的激发态布局数,可以定义成实验中的噪声,而 $P_{e,n+1}(\Delta, \tau)$ 为需要测量的蓝边带跃迁的信号强度。因此,可以将 $SNR(\Delta, \tau)$ 定义为信噪比,这一数值越高,表明频谱中蓝边带跃迁的信号越强,也表示基于扫频实验所确定的声子频率越精确。

[0052] 对于不同的实验参数,当确定好驱动频率 Ω (即等效振幅)后,需要选取合适的激光脉冲持续时间 τ_{opt} ,使得在标定声子频率过程中, $SNR(\Delta, \tau_{opt})$ 达到最大。而要实现这点,需要优先保证 $P_{e,n}(\Delta, \tau_{opt})$ 趋近于0,而这需要保证:

$$[0053] \quad \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2} \tau_{opt} = n\pi \quad (4)$$

[0054] 其中,n为奇数。因此,在扫频实验中,不同的频率差 Δ 对应的时间 τ_{opt} 不一致,这导致无法事先预设一个固定的激光脉冲持续时间,以确保在所有频率差下信噪比都保持在较高水平。为此,在根据本公开的实施例中,实现了一种动态扫频的方式,即每设置一次激光器的频率差,就基于上述公式(4)动态调整一次激光器的激光脉冲持续时间,从而确保主跃迁的概率一直保持在较低水平。

[0055] 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。

[0056] 根据一些实施例,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所述第一离子的位置。

[0057] 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。

[0058] 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。

[0059] 可以理解的是,离子在其相应位置有轻微微小移动,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。

[0060] 根据一些实施例,基于所述第一离子 $|g\rangle$ 态和 $|e\rangle$ 态之间的频率差,确定所述激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差。

[0061] 根据一些实施例,确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅包括: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第三概率;确定所述第一离子处于激发态的第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间;以及基于所述第三概率接近于1时所对应的激光脉冲持续时间,确定所述激光器照射到所述第一离子后的等效振幅。

[0062] 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 :

$$[0063] \quad \Omega = \pi/2\tau$$

[0064] 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。

[0065] 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 $\Omega = \pi/2\tau$ 。

[0066] 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。

[0067] 根据一些实施例,根据本公开实施例的方法还包括:在第一预设范围内按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,以确定在每个频率差下所述第一离子处于激发态的第二概率,其中所述第一预设范围内的频率差在预设范围内接近于所述声子频率;基于所述第二概率随所述频率差的变化进行函数拟合,以基于拟合结果确定所述第一离子与相应声子之间的耦合强度,其中,基于以下公式进行函数拟合:

$$[0068] \quad P_e(\Delta, \tau) = \frac{\eta^2 \Omega^2}{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \sin^2(\sqrt{\eta^2 \Omega^2 + (\Delta - \omega)^2} \tau)$$

[0069] 其中, $P_e(\Delta, \tau)$ 为所述第一离子处于激发态的第二概率, η 为所述第一离子与相应

声子之间的耦合强度, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差, ω 为所述声子频率, τ 为与所述声子频率所对应所述频率差所对应的所述激光脉冲持续时间。

[0070] 在一些示例中, 根据所确定的声子频率, 选取声子频率 ω 附近的频率, 细扫 $[\omega - \delta, \omega + \delta]$ 范围内布局数随着所述两束激光之间的频率差的变化, 利用上述公式 (即公式 (3)) 拟合处于激发态的布局数随着所述频率差的变化, 以确定出第一离子与相对应声子之间的耦合强度。

[0071] 可以理解的是, δ 的大小可以根据具体的离子阱芯片或实验需求进行设置, 在此不作限制。

[0072] 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。

[0073] 在根据本公开的一个示例性实施例中, 基于单个离子和单个声子进行耦合的离子阱系统进行实验数值模拟, 其中预设的实验参数为等效振幅 $\Omega = 0.1\text{MHz}$ 、声子频率 $\omega = 3\text{MHz}$ 、离子和声子耦合强度 $\eta = 0.1$ 。通过上面实施例所述的 Rabi 实验, 可以标定出的 $\Omega \approx 0.998\text{MHz}$ 。图3示出了根据本公开的实施例的在固定脉冲时间 $\tau_{\text{opt}} = n\pi / \Omega$ 时进行扫频实验所获得的布局数与激光频率差 Δ 之间的关系图。如图3所示, 图中蓝边带跃迁的峰值 (图中右侧峰值) 较小, 信噪比 $\text{SNR} = 34.8$ 。而在选取动态脉冲时间的方案中, $\tau_{\text{opt}} = n\pi / \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$, 进行扫频实验所获得的布局数与激光频率差 Δ 之间的关系如图4所示, 其中, 能明显看到蓝边带跃迁的信号明显增强, 信噪比提升到 $\text{SNR} = 46.9$, 提升 34.7% , 效果明显。在图5中, 选取 $\delta = 0.5\text{MHz}$, 根据标定出的声子频率, 可以在 $[2.5\text{MHz}, 3\text{MHz}]$ 范围内对 $|e\rangle|n+1\rangle$ 态 (在实际测量过程中为激发态) 进行细致扫频, 并通过公式 (3) 拟合出真实的 $\eta_{\text{real}} = 0.101$ 。

[0074] 根据本公开的实施例, 采用动态脉冲持续时间调制的方式, 可以使得标定过程中本底噪声保持在较低水平的同时, 提高离子阱蓝边带跃迁的概率, 这将显著提高离子标定过程的测量信号的信噪比, 使得数据处理的精度更高; 采用动态脉冲持续时间调制的方式, 可以根据不同的频率选取不同的脉冲持续时间, 这将有助于提高标定过程的效率和准确性, 从而为大规模的离子阱标定提供有益的参考方式, 增强标定的效率。

[0075] 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标定装置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, 配置为获取并确定激光器通过分束器分成的两束激光之间的初始频率差; 第二确定单元630, 配置为通过激光器照射所述第一离子, 确定所述激光照射到所述第一离子后的等效振幅; 第一调节单元640, 配置为调节所述两束激光之间的频率差, 并确定当前频率差所对应的激光脉冲持续时间, 其中, 基于公式 $\tau_{\text{opt}} = n\pi / \sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}$ 确定所述激光脉冲持续时间 τ_{opt} , 其中 n 为奇数, Ω 为所述等效振幅, Δ 为所述频率差; 第三确定单元650, 配置为对于所述频率差和所述激光脉冲持续时间的每一个组合, 确定在该组合下所述第一离子处于激发态的第一概率; 第四确定单元660, 配置为基于所述第一概率随该组合中的所述频率差的变化确定声子频率。

[0076] 这里, 离子阱芯片参数标定装置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。

[0077] 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。

[0078] 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。

[0079] 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。

[0080] 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。

[0081] 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。

[0082] 本文中以上描述的系统和技术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。

[0083] 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。

[0084] 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。

[0085] 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。

[0086] 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。

[0087] 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。

[0088] 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。

[0089] 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

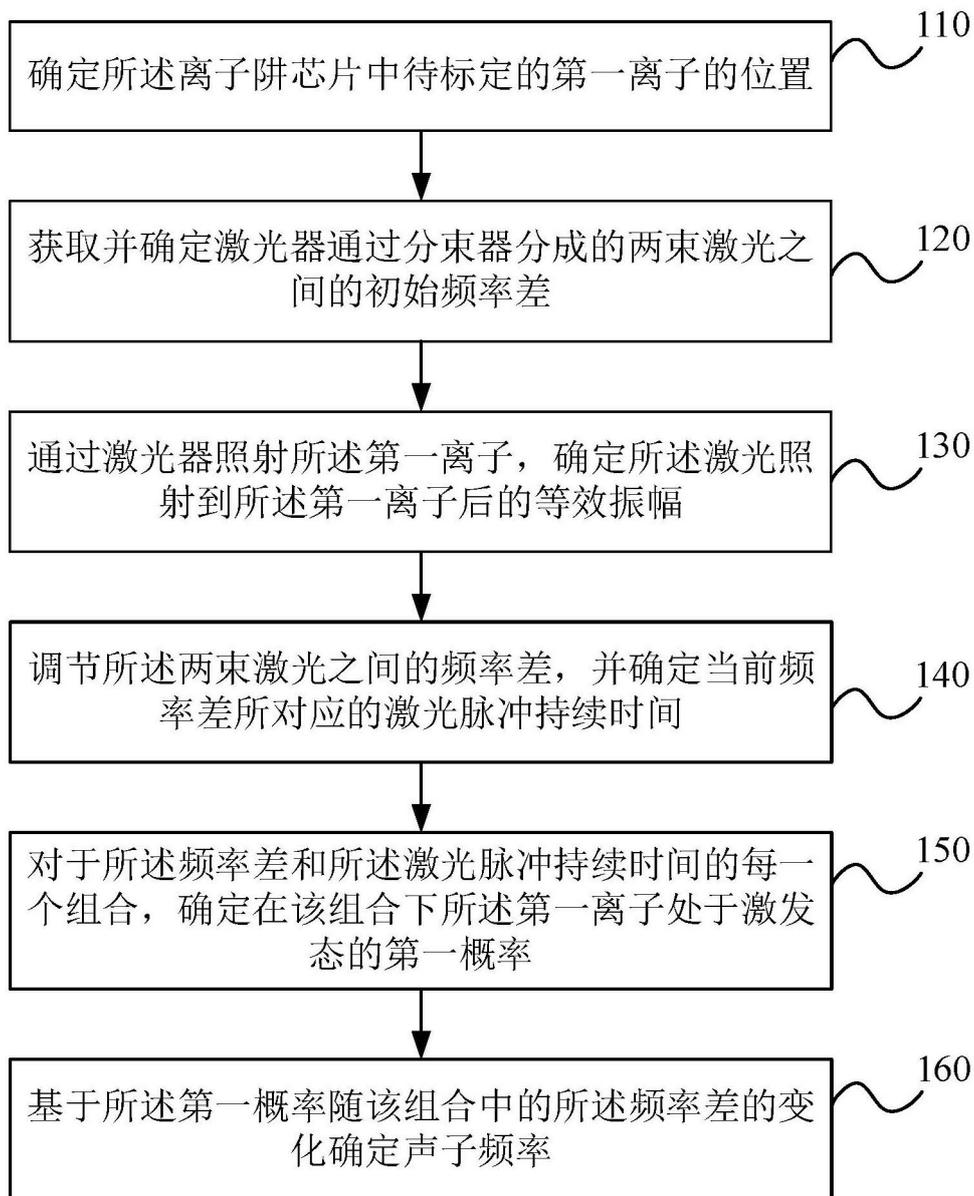


图1

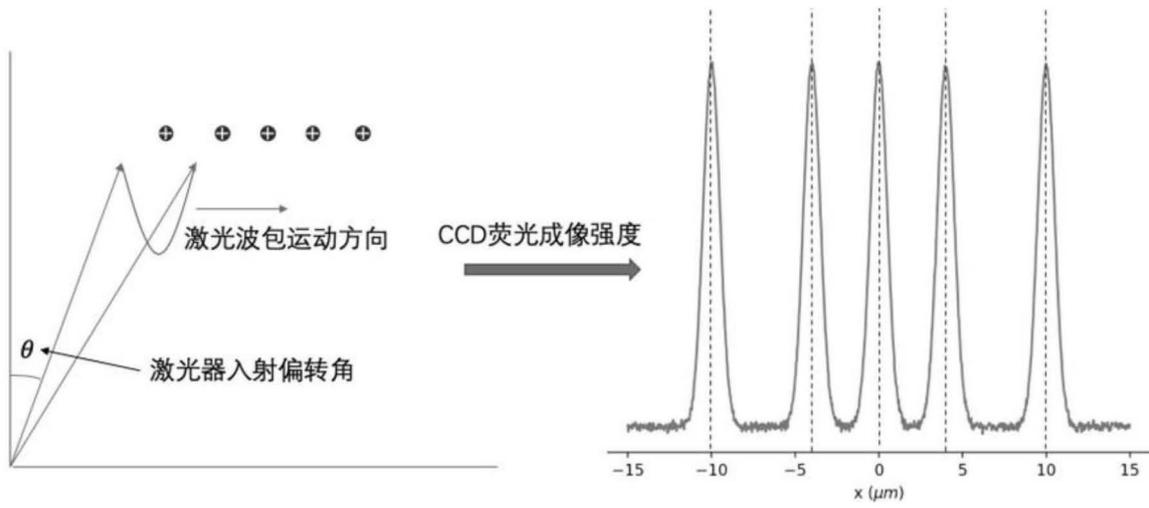


图2

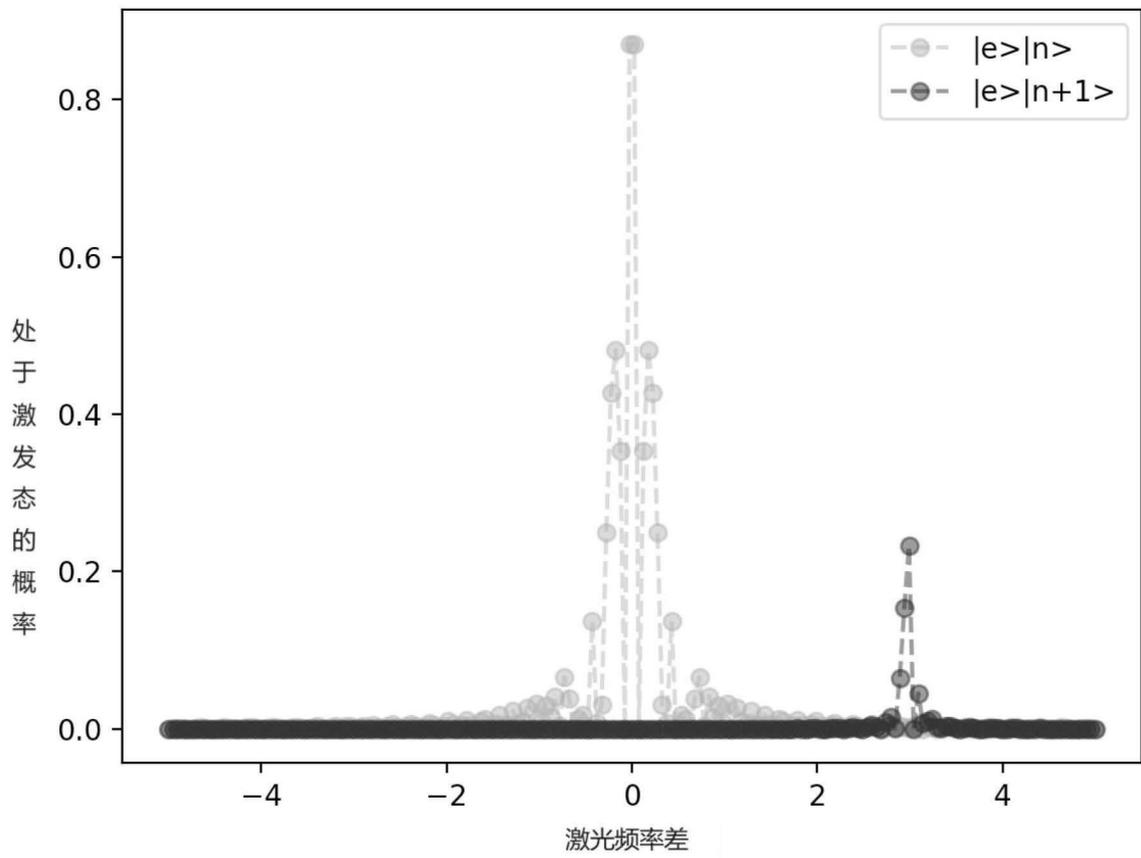


图3

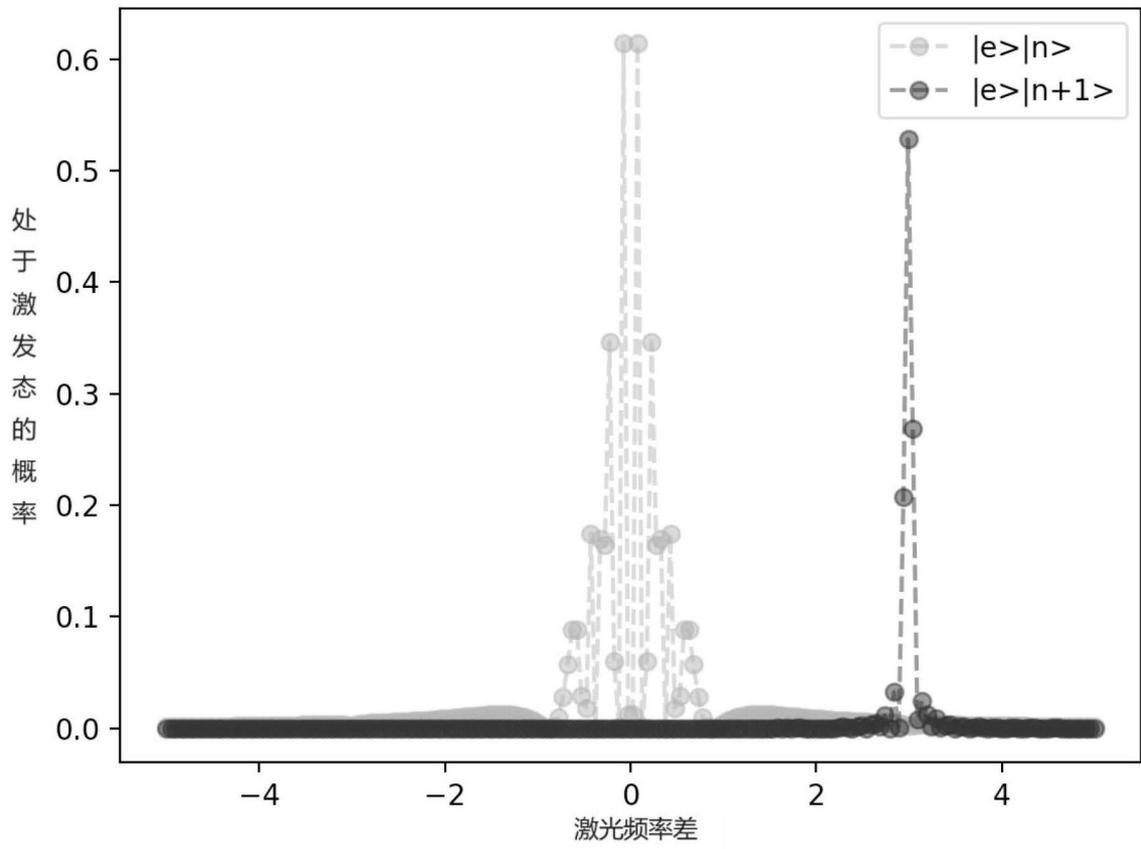


图4

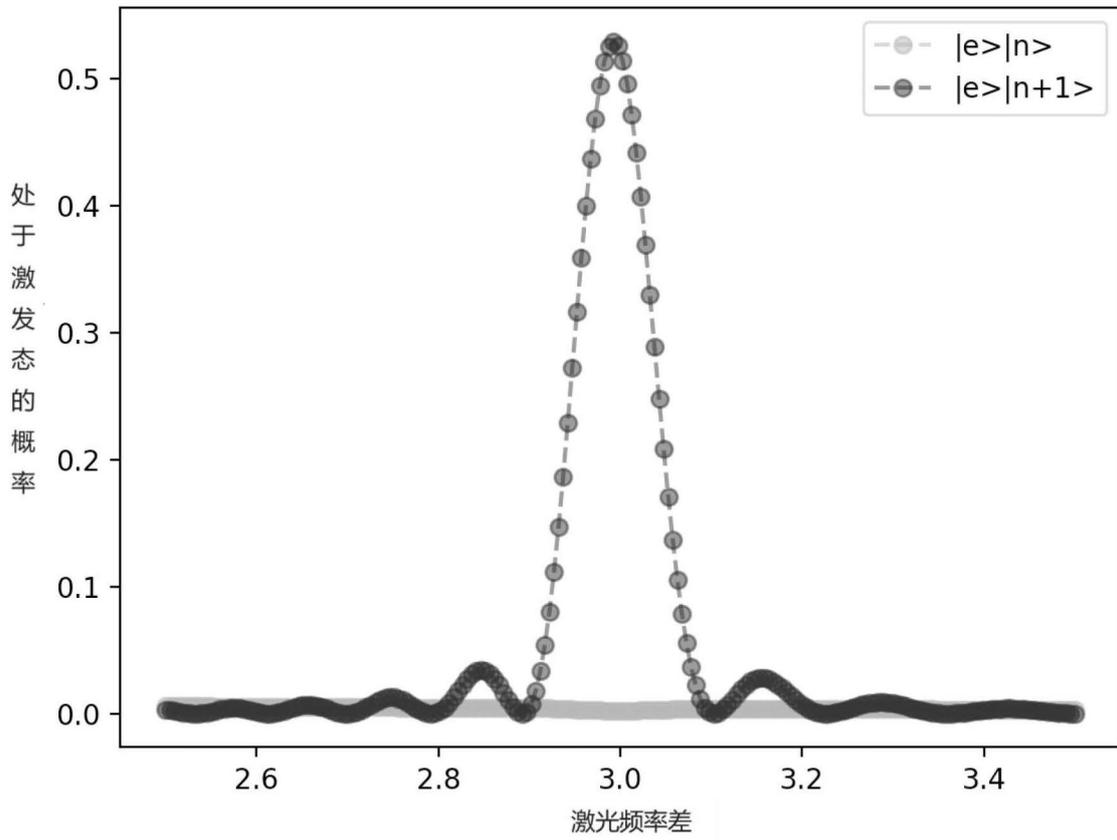


图5

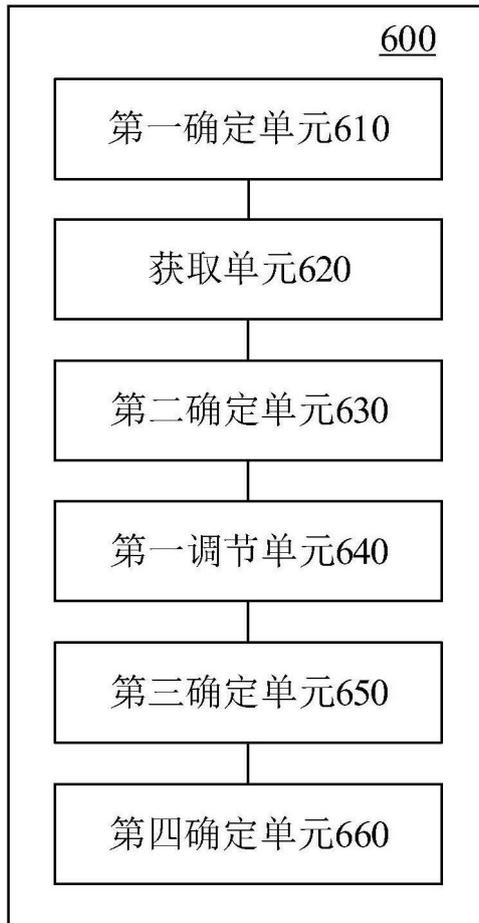


图6

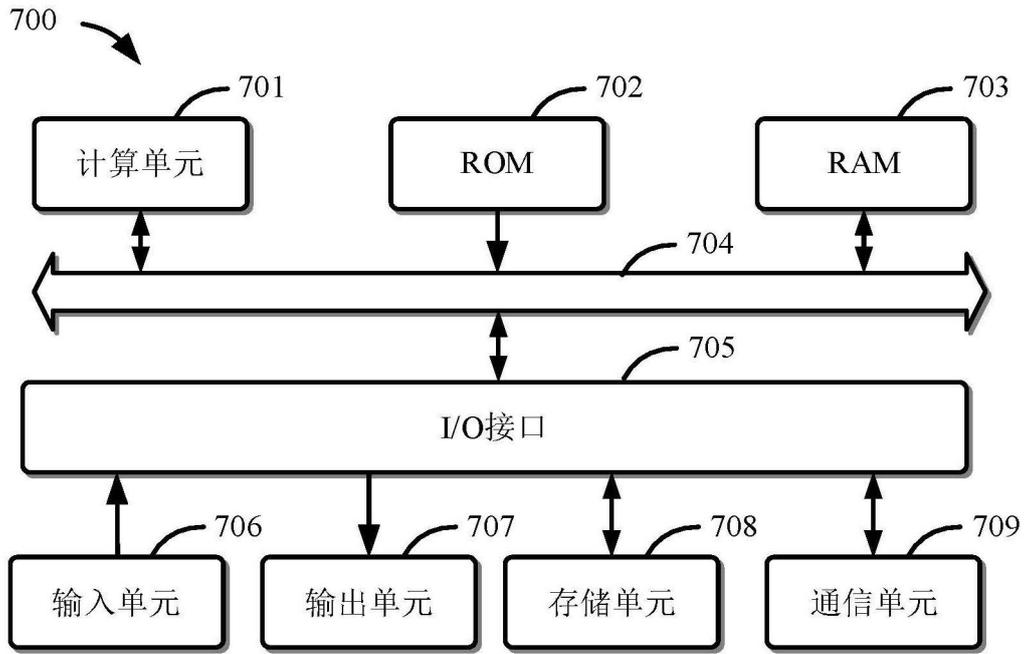


图7