

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020年2月20日 (20.02.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/034925 A1

- (51) 国际专利分类号:
H01J 49/42 (2006.01) **G21K 1/00** (2006.01)
H04L 9/08 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/100253
- (22) 国际申请日: 2019年8月12日 (12.08.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201810925152.0 2018年8月14日 (14.08.2018) CN
- (71) 申请人: 华为技术有限公司 (HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼, Guangdong 518129 (CN)。

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

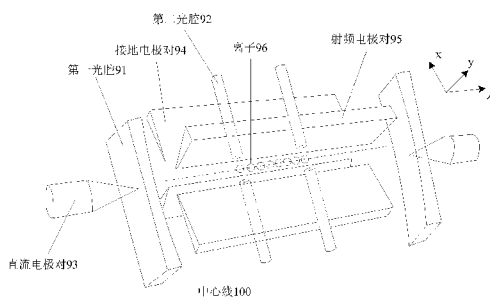
本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

- (72) 发明人: 曹冬阳 (CAO, Dongyang); 中国广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼, Guangdong 518129 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: IONIC OPTICAL CAVITY COUPLING SYSTEM AND METHOD

(54) 发明名称: 离子光腔耦合系统及方法



91 FIRST OPTICAL CAVITY
92 SECOND OPTICAL CAVITY
93 DIRECT CURRENT ELECTRODE PAIR
94 GROUNDING ELECTRODE PAIR
95 RADIO FREQUENCY ELECTRODE PAIR
96 ION
100 CENTRAL LINE

(57) Abstract: An ionic optical cavity coupling system and method. The system comprises: a first optical cavity (91), a second optical cavity (92), and an ion trap system comprising a direct current electrode pair (93), a grounding electrode pair (94), and a radio frequency electrode pair (95). At least one ion (96) is arranged in the ion trap system; a straight line where a balance position of the at least one ion (96) is located and which is vertical to two optical cavity mirrors of the first optical cavity (91) is taken as a central line (100), and an included angle is defined between the second optical cavity (92) and the central line (100); the first optical cavity (91) is used for obtaining a quantum optical signal and sending the quantum optical signal to the ion trap system, so that quantum information of the quantum optical signal is transferred to a single ion (96) in the ion trap system; the second optical cavity (92) is used for obtaining quantum information in the single ion (96) in the ion trap system. The system and the method improve quantum state transfer efficiency between ions and photons.

WO 2020/034925 A1

(57) 摘要：一种离子光腔耦合系统及方法，其中，该系统包括：第一光腔(91)、第二光腔(92)以及包括直流电极对(93)、接地电极对(94)和射频电极对(95)的离子阱系统，离子阱系统中排列有至少一个离子(96)，至少一个离子(96)的平衡位置所在直线且与第一光腔(91)的两个光腔镜面垂直的直线为中心线(100)，第二光腔(92)与中心线(100)具有夹角，第一光腔(91)用于获取量子光信号并将其发送至离子阱系统中，以使该量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子(96)中，第二光腔(92)用于获取离子阱系统中单个离子(96)的量子信息。这一系统和方法提高了离子与光子的量子态转移效率。

离子光腔耦合系统及方法

本申请要求于 2018 年 08 月 14 日提交的申请号为 201810925152.0、申请名称为“离子光腔耦合系统及方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及光电子技术领域，尤其涉及一种离子光腔耦合系统及方法。

背景技术

离子阱是联合电场和磁场来捕获带电粒子的一项技术，广泛用于质谱仪、基本物理参数测定、量子计算、量子存储、原子钟等领域。由于离子阱具有优良的量子比特性质，因而可以应用于量子信息处理中，通过建立量子网络以实现量子信息在两个甚至多个量子节点（离子阱）中无失真地传输。多离子与光腔的耦合是构建复杂量子网络和分布式量子计算的核心。因而，如何在离子系统中实现离子与光腔的强耦合是实现分布式量子计算的关键。

目前，现有的离子光腔耦合方案中，光腔沿着离子阱系统径向设置。在该方案的量子节点信息转移过程中，首先利用光腔获取量子光信号，并将离子阱系统中离子与量子光信号的相互作用保存到两个离子的纠缠态相位信息中，其次将两离子的纠缠态相位信息转化为光子的相位信息，最后光子的相位信息从光腔射出，并经过光纤信道传到远距离的另一个量子节点，实现了量子节点信息的转移。

然而，上述离子光腔耦合方案中，由于量子光信号进入光腔后，与离子相互作用的作用结果需要保存到两个离子的纠缠态相位信息中，再转化为光子的相位信息从光腔出射，离子与光子的量子态转移效率低。

发明内容

本申请提供离子光腔耦合系统及方法，用于解决现有离子光腔耦合方案中离子与光子的量子态转移效率低的问题。

本申请第一方面提供一种离子光腔耦合系统，包括：第一光腔、第二光腔，以及离子阱系统，所述离子阱系统，包括：直流电极对、接地电极对和射频电极对；

所述离子阱系统中排列有至少一个离子，所述至少一个离子的平衡位置所在直线为中心线，所述中心线与所述第一光腔的两个光腔镜面垂直；

所述第一光腔的两个光腔镜面对称分布在所述至少一个离子的两侧，所述第二光腔的两个光腔镜面分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中，且所述第二光腔与所述中心线具有夹角；

所述直流电极对的两个直流电极对称分布在所述第一光腔的两个光腔镜面的外侧，所述接地电极对和所述射频电极对分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中；

所述第一光腔用于获取量子光信号并将所述量子光信号发送至所述离子阱系统中，以使所述量子光信号的量子信息转移到所述离子阱系统的单个离子中；

所述第二光腔用于获取所述离子阱系统中所述单个离子的量子信息。

该技术方案中，量子光信号从第一光腔中进入离子阱系统，并且从第二光腔中射出，避免了用同一个光腔读入读出带来的一半损耗，提高了离子与光子的量子态转移效率。

可选的，在第一方面的一种可能实现方式中，所述第一光腔用于获取量子光信号并将所述量子光信号发送至所述离子阱系统中，以使所述量子光信号的量子信息转移到所述离子阱系统的单个离子中，包括：

所述第一光腔用于将获取到的所述量子光信号发送至所述离子阱系统中，使所述量子光信号被所述至少一个离子吸收，所述量子光信号的量子信息依次转移到所述至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再从所述整体谐振模激发态中转移到所述离子阱系统的单个离子的激发态中。

本实施例中，利用量子光信号通过被离子阱系统中至少一个离子吸收，可以使量子信息依次转移到上述至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再转移到离子阱系统的单个离子的激发态中，进而为量子信息从第二光腔读出离子阱系统奠定了基础。

可选的，在第一方面的另一种可能实现方式中，所述第二光腔用于获取所述离子阱系统中所述单个离子的量子信息，包括：

所述第二光腔用于通过激光定位所述离子阱系统中的所述单个离子，获取所述单个离子的量子信息。

本申请实施例中，由于第二光腔的束腰半径可以与两个离子间距相当，因而，激光通过第二光腔可以只作用在单个离子上而不影响其他离子的状态，实现了单个离子寻址。

可选的，在第一方面的再一种可能实现方式中，在所述离子阱系统中，所述第一光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度、所述第二光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，所述 g_0 通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为所述第一光腔或所述第二光腔的长度， ω_0 为所述第一光腔或所述第二光腔的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为离子的自发辐射率。

可选的，所述第一光腔与所述离子阱系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示：

$$g_N = \sqrt{N}g_0$$

其中，所述 N 为所述离子阱系统中离子的总数量。

在本实施例中，从第一光腔获取的量子光信号可以与离子阱系统中的所有离子相互作用，提高了该离子光腔耦合系统的耦合强度。

可选的，在第一方面的又一种可能实现方式中，所述第一光腔的第一光腔镜面和所述第二光腔的第一光腔镜面均镀第一反射膜，所述第一光腔的第二光腔镜面和所述第二光腔的第二光腔镜面均镀第二反射膜，所述第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，所述第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，所述第一预设范围的最大值小于所述第二预设范围的最小值。

本实施例中，通过在第一光腔和第二光腔的两个光腔镜面分别镀第一反射膜和第二反射膜，这样既可以从外界获取量子光信号，使其在第一光腔的两个光腔镜面之间来回反射，反复与离子相互作用，进而增加量子光信号与离子阱系统中离子的相互作用概率，其次，量子

光信号的量子信息转移到单个离子中后，也可以通过第二光腔获取单个离子的量子信息，实现了单个离子的寻址，从而实现了离子中信息的传递。

可选的，在第一方面的又一种可能实现方式中，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述中心线的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极对称分布在所述中心线的两侧，所述直流电极对的两个直流电极的连线与所述中心线平行。

可选的，在第一方面的又一种可能实现方式中，所述接地电极对中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，所述夹角大于0度且小于180度；

所述第二光腔的两个光腔镜面以所述中心线为中心对称分布，所述第二光腔的一个光腔镜面位于所述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，所述第二光腔的另一个光腔镜面位于另一个接地电极与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

本申请实施例中，第一光腔、第二光腔、直流电极对、接地电极对以及射频电极对各部分的上述位置关系，既可以将至少一个离子囚禁在离子阱系统中，又可以通过第一光腔获取量子光信号，通过第二光腔定位离子阱系统中的单个离子，可以从离子阱系统中读出单个离子的量子信息，实现了离子信息的传递。

可选的，在第一方面的又一种可能实现方式中，在所述离子阱系统中的离子数量为至少两个时，所述第一光腔的束腰半径大于所述至少两个离子中相邻两个离子的间距，所述第二光腔的束腰半径小于或等于所述至少两个离子中相邻两个离子的间距。

这样，第一光腔可以实现与离子阱中所有离子的耦合，并且通过第二光腔可以定位并获取到离子阱系统中的单个离子。

本申请第二方面提供一种离子光腔耦合方法，适用于离子光腔耦合系统，所述离子光腔耦合系统包括：第一光腔、第二光腔，以及离子阱系统，所述离子阱系统，包括：直流电极对、接地电极对和射频电极对，所述离子阱系统中排列有至少一个离子，所述至少一个离子的平衡位置所在直线为中心线，所述中心线与所述第一光腔的两个光腔镜面垂直，所述第一光腔的两个光腔镜面对称分布在所述至少一个离子的两侧，所述第二光腔的两个光腔镜面分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中，且所述第二光腔与所述中心线具有夹角，所述直流电极对的两个直流电极对称分布在所述第一光腔的两个光腔镜面的外侧，所述接地电极对和所述射频电极对分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中；

所述方法包括：

利用所述第一光腔获取量子光信号，并将所述量子光信号发送至所述离子阱系统中，所述量子光信号携带量子信息；

利用所述第一光腔和所述离子阱系统，将所述量子光信号的量子信息转移到所述离子阱系统的单个离子中；

利用所述第二光腔获取所述离子阱系统中所述单个离子的量子信息。

该技术方案中，量子光信号从第一光腔进入离子阱系统，并且从第二光腔取出，避免了用同一个光腔读入读出带来的一半损耗，提高了离子与光子的量子态转移效率。

可选的，在第二方面的一种可能实现方式中，所述利用所述第一光腔和所述离子阱系统，将所述量子光信号的量子信息转移到所述离子阱系统的单个离子中，包括：

利用所述第一光腔和所述离子阱系统的囚禁作用，使所述量子光信号被所述离子阱系统中的所述至少一个离子吸收；其中，所述量子光信号的量子信息依次转移到所述至少一个离

子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再从所述整体谐振模激发态中转移到所述离子阱系统的单个离子的激发态中。

可选的，在第二方面的另一种可能实现方式中，所述利用所述第二光腔获取所述离子阱系统中所述单个离子的量子信息，包括：

利用激光通过所述第二光腔，定位所述离子阱系统中的所述单个离子；

利用所述第二光腔，获取所述单个离子的量子信息。

可选的，在第二方面的再一种可能实现方式中，在所述离子阱系统中，所述第一光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度、所述第二光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，所述 g_0 通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为所述第一光腔或所述第二光腔的长度， ω_0 为所述第一光腔或所述第二光腔的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为单离子的自发辐射率。

可选的，所述第一光腔与所述离子阱系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示：

$$g_N = \sqrt{N}g_0$$

其中，所述 N 为所述离子阱系统中离子的总数量。

可选的，在第二方面的又一种可能实现方式中，所述第一光腔的第一光腔镜面和所述第二光腔的第一光腔镜面均镀第一反射膜，所述第一光腔的第二光腔镜面和所述第二光腔的第二光腔镜面均镀第二反射膜，所述第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，所述第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，所述第一预设范围的最大值小于所述第二预设范围的最小值。

可选的，在第二方面的又一种可能实现方式中，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述中心线的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极对称分布在所述中心线的两侧，所述直流电极对的两个直流电极的连线与所述中心线平行。

可选的，在第二方面的又一种可能实现方式中，所述接地电极对中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，所述夹角大于0度且小于180度；

所述第二光腔的两个光腔镜面以所述中心线为中心对称分布，所述第二光腔的一个光腔镜面位于所述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，所述第二光腔的另一个光腔镜面位于另一个接地电极与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

可选的，在第二方面的又一种可能实现方式中，在所述离子阱系统中的离子数量为至少两个时，所述第一光腔的束腰半径大于所述至少两个离子中相邻两个离子的间距，所述第二光腔的束腰半径小于或等于所述至少两个离子中相邻两个离子的间距。

第二方面的离子光腔耦合方法，可以通过第一方面的离子光腔耦合系统实现，其实现原理和技术效果类似，在此不再赘述。

本申请实施例提供的离子光腔耦合系统及方法，首先利用第一光腔获取量子光信号，并将获取到的量子光信号发送至离子阱系统中，该量子光信号携带量子信息，其次利用第一光腔和离子阱系统，将上述量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中，最后再利用第二光腔获取离子阱系统中单个离子的量子信息。该技术方案中，量子光信号从第一光腔进入离子阱系统，并且从第二光腔取出，避免了用同一个光腔读入读出带来的一半损耗，提

高了离子与光子的量子态转移效率。

附图说明

- 图 1 为线性阱的基本结构示意图；
- 图 2 为图 1 所示线性阱的正视图；
- 图 3 为图 1 所示线性阱的左视图；
- 图 4 为静电场中静电势的马鞍点示意图；
- 图 5 为钙离子的能级结构示意图；
- 图 6 为离子和光子间量子信息的转移示意图；
- 图 7 为离子和光子间量子信息转移的硬件结构示意图；
- 图 8 为本申请实施例提供的离子光腔耦合系统的结构示意图；
- 图 9 为离子光腔耦合系统的平面示意图；
- 图 10 为离子耦合到光腔的时能级结构的变化示意图；
- 图 11 为量子光信号在离子光腔耦合系统中的传输示意图；
- 图 12 为本申请实施例提供的离子光腔耦合方法实施例的流程示意图。

具体实施方式

以下，对本申请实施例中的部分用语进行解释说明，以便于本领域技术人员理解：

强耦合：原子或者离子和光腔的耦合强度远远大于原子或者离子的自发辐射强度和光腔的衰减率。

分布式量子计算：用多个量子节点，每个量子节点包含多个量子比特的系统共同完成某个量子计算任务，不同量子节点之间的信息传输由携带量子信息的光子完成。分布式量子计算特别合适一些现在还无法大规模集成的硬件系统，还特别适合单依靠本地量子节点无法完成的量子计算任务。

量子网络：在不同量子节点之间用光子传输量子信息，使得不同量子节点之间可以交互。

光腔的模式体积：等效的光腔体积，正比于光腔的束腰半径平方再乘光腔长度。

大光腔：光腔的束腰半径与离子之间的间距相比较较大，即束腰半径大于两个离子间距的光腔。可选的，在本申请实施例中，大光腔用第一光腔表示。

小光腔：光腔的束腰半径与离子之间的间距相比较小，即束腰半径小于两个离子间距的光腔。可选的，在本申请实施例中，小光腔用第二光腔表示。

可选的，下面首先针对本申请实施例适用场景进行简要说明。

离子阱是联合电场和磁场来捕获带电粒子的一项技术，广泛用于质谱仪、基本物理参数测定、量子计算、量子存储、原子钟等领域。想要用电磁场捕获带电粒子，需要用电磁场在空间产生电势能低点，但是根据麦克斯韦电磁方程组，带电粒子在静电场中没有三维势能最低点，所以仅仅用静电场不能捕获带电粒子。

可以理解的是：带电粒子会沿着电场线方向运动，由于静电场的空间中没有其他电荷，电场线不会终止，所以带电粒子会一直朝一个方向运动不会静止，也不会局限在某个区域内。为了捕获带电粒子，需要联合静电场和静磁场或者用静电场和交变电场结合，前者称为彭宁阱（Penning Trap），后者称为保罗阱（Paul Trap）。Penning Trap 一般用于测量离子或者稳定

的亚原子粒子的特性,例如,电子磁矩等。Paul Trap 一般用于原子钟或者量子信息处理领域。Paul Trap 又称为电四级离子阱或者射频阱,其根据能否同时捕获多个离子(是否有多个电势能低点)可以分为线性阱和针型阱。线性阱因为可以同时捕获多个离子广泛应用于量子信息处理领域,也被认为是最有可能实现量子计算的硬件系统之一。可选的,在本申请实施例中,如无特殊声明,离子阱均是指线性阱。

图 1 为线性阱的基本结构示意图。图 2 为图 1 所示线性阱的正视图。图 3 为图 1 所示线性阱的左视图。可选的,如图 1 至图 3 所示,线性阱可以由六片电极构成,其中,四片刀片形状的电极分为两组,一组对角线电极加交变电压(称为射频电极),另一组对角线电极接地(称为接地电极),从而在径向(XY 方向)形成电四级势,两端的针型电极加电压相同的静电电压(称为直流电极),从而在轴向(Z 方向)形成静电束缚。上述六片电极电极加在一起形成三维势能低点,束缚带电离子。

可选的,为了使本领域技术人员更好的理解线性阱,下述对线性阱的基本原理进行简要说明。

可选的,自由空间中的静电势必须满足拉普拉斯(Laplace)方程,具体如公式(1)所示:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (1)$$

式中, ϕ 表示静电场中的电势能, ∇ 为梯度符号,表示对电势能求偏导数。

此外,线性阱的静电势可以用如下公式(2)表示:

$$\Phi(x,y,z) = \sum_{i=x,y,z} \Phi_0 k_i r_i^2 \quad (2)$$

式中, r_i 表示坐标 (x,y,z) 所在的空间位置, k_i 表示每个坐标分量对应的系数, Φ_0 为离子的基准电势能,是常数。

根据公式(1)和公式(2)可以得到 $k_x x + k_y y + k_z z = 0$ 。因而, k_x, k_y, k_z 中的某个系数必须为负数,即静电势在某个方向有亚稳态的马鞍点,具体如图 4 所示,图 4 为静电场中静电势的马鞍点示意图。由图 4 可知,带电粒子在静电场中不会静止或被局限在某个区域内,所以,静电场不能稳定的束缚带电粒子。

可选的,如图 4 所示,如果将静电势旋转起来,就可以得到等效的二维束缚电势能。具体的,在实际应用中,通过在 xy 方向加交变电场,形成 xy 方向的二维束缚势能,在 z 方向加静电场,形成 z 方向的一维束缚势能。可选的,xy 方向的二维束缚势能 $\Phi_{rad}(x,y,z,t)$ 可以用公式(3)表示,z 方向的一维束缚势能 $\Phi_{ax}(x,y,z)$ 可以用公式(4)表示:

$$\Phi_{rad}(x,y,z,t) = \frac{V_{RF}\cos(\Omega_{RF}t) + U_r}{2} (\alpha_x x^2 + \alpha_y y^2 + \alpha_z z^2) \quad (3)$$

$$\Phi_{ax}(x,y,z) = \frac{U_{DC}}{2} (\beta_x x^2 + \beta_y y^2 + \beta_z z^2) \quad (4)$$

式中, V_{RF} 表示交变电场的电压, Ω_{RF} 表示交变电场的频率, U_r 表示静电场在 xy 方向上的电压, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 分别表示运动离子在 xy 方向上的每个坐标分量对应的系数, U_{DC} 表示静电场在 z 方向的电压, $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ 分别表示运动离子在 z 方向上的每个坐标分量对应的系数。在本实施例中, $V_{RF}, \Omega_{RF}, U_r, U_{DC}, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 以及 $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ 均为常数。

可选的,静电场中的运动离子满足公式(5)所示的牛顿第二定律:

$$\ddot{r} = \frac{F}{m} = \frac{e}{m} E(x,y,z,t) = -\frac{e}{m} \nabla \Phi_{tot} = -\frac{e}{m} (\nabla \Phi_{rad} + \nabla \Phi_{ax}) \quad (5)$$

式中, \ddot{r} 表示运动离子的加速度, F 表示运动离子受到的电场力, m 是运动离子的质量, $E(x,y,z,t)$ 表示运动离子在 t 时刻、空间坐标为 (x,y,z) 处的电场强度, e 表示运动离子的电

荷量, Φ_{rad} 为 xy 方向的二维束缚势能, Φ_{ax} 为 z 方向的一维束缚势能。

可选的, 根据上述公式 (3)、公式 (4) 和公式 (5) 可以得到运动离子的运动轨道 $r_i(t)$, 该 $r_i(t)$ 用公式 (6) 表示:

$$r_i(t) \approx \bar{r}_i \cos(\omega_i t) \left(1 + \frac{q_i}{2} \cos(\Omega_{RF} t)\right) \quad (6)$$

式中, $r_i(t)$ 表示运动离子的运动轨道, \bar{r}_i 表示运动离子所做谐振运动的幅度, ω_i 为运动离子所做谐振运动的谐振频率, 且 $\omega_i = \frac{\Omega_{RF}}{2} \sqrt{a_i + \frac{q_i^2}{2}}$, a_i 和 q_i 表示常数, 且 $a_i \ll 1$, $q_i \ll 1$, Ω_{RF} 表示交变电场的频率。

综上所述, 离子在线性阱中的运动可以分为两部分, 一部分是幅度为 \bar{r}_i , 频率为 ω_i 的谐振运动, 另一部分是附加驱动的微运动 (a_i 和 q_i 是远小于 1 的常数, a_i 和 q_i 的大小与线性阱的结构和所加电压相关)。实际应用中, 一般情况下, 微运动可以通过加外部补偿电极来抵消掉, 所以, 一般只考虑离子的谐振运动。可以理解的是, 离子在线性阱中的运动可以类比弹簧连接的小球在平衡位置附近来回振动, 所述平衡位置是指离子在线性阱 (离子阱) 中做谐振运动时的中心位置, 离子位于该平衡位置时, 离子的回复力为 0, 而且, 离子在该平衡位置处的速度最大, 动能最大, 势能为 0。

下述简单介绍离子阱的光学性质以及离子阱与光的相互作用。

由上述分析可知, 离子会在离子阱中做谐振运动, 然而, 外部的电磁噪声和空间中残留的高速运动粒子会使得离子的能量升高, 从而跳出离子阱外。为了能够长时间将离子束缚在离子阱中, 需要将离子的动能减少, 即, 控制离子在谐振运动时的振幅减小。

可选的, 在原子物理中, 一般采用多普勒冷却的方式给原子或离子降温。

通常情况下, 一般用于量子信息处理的离子阱系统都用二价原子, 因为失去一个电子后原子核外只有一个电子, 其性质类似于氢原子的性质。可选的。本申请实施例中, 离子阱中的离子以钙离子为例说明。示例性的, 图 5 为钙离子的能级结构示意图。

以图 5 所示的钙离子为例, 如图 5 所示, 离子首先处于能量基态 S (例如, 用 $4^2S_{1/2}$ 表示), 当用波长为 397nm 的激光照射离子阱中的束缚离子时, 离子的状态会从基态 S (例如, 用 $4^2S_{1/2}$ 表示) 跳跃到激发态 P (例如, 用 $4^2P_{1/2}$ 表示), 由于激发态 P 是不稳定的状态, 其会快速辐射出 397nm 光子的能量, 离子重新回到基态 S ($4^2S_{1/2}$), 不断重复这个过程, 离子的能量就被波长为 397nm 的光子带走, 从而降低了离子的能量。

同理, 对于处于能量基态 S ($4^2S_{1/2}$) 的离子, 当用波长为 393nm 的激光照射离子阱中的束缚离子时, 离子的状态会从基态 S ($4^2S_{1/2}$) 跳跃到激发态 P (例如, 用 $4^2P_{3/2}$ 表示), 由于激发态 P 是不稳定的状态, 其会快速辐射出 393nm 光子的能量, 离子重新回到基态 S ($4^2S_{1/2}$), 不断重复这个过程, 离子的能量就被波长为 393nm 的光子带走, 从而降低了离子的能量。

值得说明的是, 采用多普勒冷却的方式可以快速降低离子的温度, 例如, 可以将离子的温度从室温 1000K 降低到 500uK。经过多普勒冷却后的束缚离子就可以作为很好的量子比特用于量子信息处理。

量子信息处理中一个重要的方向是构建量子网络, 量子网络的特点是量子信息要能在两个甚至多个量子节点中无失真地传输。由于离子阱具有优良的量子比特性质成为实现量子节点的候选之一。为了让量子信息能够在两个远距离的离子阱中间传输, 首先需要将一个量子节点中的离子的量子信息转移给光子, 再将光子通过光信道传输到另一个量子节点处, 在该

量子节点中再把光子的信息逆向传给离子。

可选的，在本申请实施例中，仍然以钙离子为例来阐述离子和光子间量子信息的传递过程，具体过程如图 6 所示。图 6 为离子和光子间量子信息的转移示意图。

参照图 5 和图 6 所示，钙离子在离子阱中能级图参照图 5 所示，但是，当离子阱加上外部磁场时，由于塞曼 (Zeeman) 效应 (当离子被置于强磁场中时，离子发出的每条光谱线都分裂成三条)，钙离子的能级会劈裂。

可选的，如图 5 和图 6 所示，本申请实施例中，用基态劈裂后的能级 (基态 s 和基态 s') 来编码离子的量子态，并用亚稳态 $D (3^2D_{5/2})$ 的能级作为过渡能级来制备离子的量子态 (即，通过波长为 729nm 的激光激发离子)，得到离子的量子态用公式 (7) 表示：

$$\text{离子的量子态} = \cos \alpha |s\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |s'\rangle \quad (7)$$

式中， $| \rangle$ 符号表示量子态， $|s\rangle$ 表示离子处于基态 s ， $|s'\rangle$ 表示离子处于基态 s' ， α 表示常数，在本申请的实施例中，后续如无特殊说明，均沿用此表示， $\cos \alpha$ 表示离子处于基态 s 时的系数， $e^{i\varphi} \sin \alpha$ 表示离子处于基态 s' 时的系数。 φ 表示离子量子态的相位差。

在本申请实施例中，为了无失真地将离子的量子态传输到光子的量子态，需要保证量子态的幅度和相位都不变，其可以用双色拉曼虚过程来实现。可选的，双色拉曼虚过程表示采用两束激光照射离子，但只发射光子，而不接收光子。

可选的，如图 5 和图 6 所示，在磁场中，离子的激发态 P 也会被劈裂成两个能级，分别对应基态 S 的两个能级，用 393nm 的双色拉曼激光照射离子 (非共振激发)，离子会跃迁到激发态 $P (4^2P_{3/2})$ ，由于激发态 $P (4^2P_{3/2})$ 不稳定，会掉回亚稳态 $D (3^2D_{5/2})$ ，并发出 854nm 的光子。当用 397nm 的双色拉曼激光激发离子 (非共振激发)，离子会跃迁到激发态 $P (4^2P_{1/2})$ ，由于激发态 $P (4^2P_{1/2})$ 不稳定，会掉回亚稳态 $D (3^2D_{3/2})$ ，并发出 866nm 的光子。

可以理解的是，光子的能量和波长成反比，光子的波长越长，能量越小。因而，利用 393nm 和 397nm 的双色拉曼激光照射离子时，离子会跳跃到不同的高度，具体如 5 所示。

由于磁场定义了量子化轴，所以，辐射的光子根据角动量的改变会有不同的偏振，最终离子处于亚稳态 D 上，辐射的光子的量子态用公式 (8) 表示：

$$\text{光子的量子态} = \cos \alpha |H\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |V\rangle \quad (8)$$

式中， H 表示光子量子态的水平方向， V 表示光子量子态的垂直方向， φ 为光子量子态的相位差， $\cos \alpha$ 表示光子处于亚稳态 D 时在 H 方向的系数， $e^{i\varphi} \sin \alpha$ 表示光子处于亚稳态 D 时在 V 方向的系数。

由公式 (7) 和公式 (8) 可知光子的量子态与离子的量子态的幅度和相位完全一致，因而实现了离子的量子信息到光子的量子信息之间的相干转移，公式如公式 (9) 所示：

$$(\cos \alpha |s\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |s'\rangle) \otimes |0\rangle \rightarrow |D\rangle \otimes (\cos \alpha |H\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |V\rangle) \quad (9)$$

其中， $(\cos \alpha |s\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |s'\rangle)$ 表示离子的量子态， $|0\rangle$ 表示光子的初态， $|D\rangle$ 表示离子处于亚稳定态 D ， $(\cos \alpha |H\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |V\rangle)$ 表示光子的量子态。

可选的，图 7 为离子和光子间量子信息转移的硬件结构示意图。如图 7 所示，该离子和光子间量子信息转移的硬件结构示意图可以包括：光腔 71、电极 72、透镜 73、分束器 74 和光电转换器 75。

可选的，如图 7 所示，通过光腔 71、电极 72、透镜 73、分束器 74 和光电转换器 75 的相互作用，实现了离子量子信息到光子量子信息的转移。在该实施例中，由于单个离子每次

只能辐射单个光子，加上信道上的损耗，光子的收集效率会非常低。此外，双色拉曼虚过程必须要用光腔来实现 Λ 型的光转移。通过在光腔的一面镜子上镀超高反射膜，另一面镜子上镀高反射膜，使得 854nm 光子可以在光腔内震荡多次后再出射，这样可以通过受激辐射的方式大大提高辐射光子数量，从而提高了量子信息从离子到光子的转移效率。因而，离子耦合到光腔的结构是实现量子网络，分布式量子计算的核心。

图 8 为本申请实施例提供的离子光腔耦合系统的结构示意图。图 9 为离子光腔耦合系统的平面示意图。如图 8 和图 9 所示，该离子光腔耦合系统，可以包括：第一光腔 91、第二光腔 92，以及离子阱系统，该离子阱系统，包括：直流电极对 93、接地电极对 94 和射频电极对 95。

参照图 8 和图 9 所示，离子阱系统中排列有至少一个离子 96，所述至少一个离子 96 的平衡位置所在直线为中心线 100，该中心线 100 与第一光腔 91 的两个光腔镜面垂直。

其中，第一光腔 91 的两个光腔镜面对称分布在上述至少一个离子 96 的两侧，第二光腔 92 的两个光腔镜面分布在第一光腔 91 的两个光腔镜面形成的空间中，且第二光腔 92 与中心线 100 具有夹角。

可选的，上述直流电极对 93 的两个直流电极对称分布在第一光腔 91 的两个光腔镜面的外侧，接地电极对 94 和射频电极对 95 分布在第一光腔 91 的两个光腔镜面形成的空间中。

可选的，上述至少一个离子 96 排列在直流电极对 93、接地电极对 94 和射频电极对 95 形成的空间中。

其中，该第一光腔 91 用于获取量子光信号并将量子光信号发送至上述离子阱系统中，以使量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中，该第二光腔 92 用于获取该离子阱系统中所述单个离子的量子信息。

具体的，参照图 8 和图 9 所示，离子阱系统包括的直流电极对 93、接地电极对 94 和射频电极对 95 可以称为离子阱电极，该三对电极可以用于产生电磁场，进而囚禁离子。可选的，本申请实施例提供的离子光腔耦合系统以离子阱系统包括 1 个直流电极对 93、1 个接地电极对 94 和 1 个射频电极对 95 进行举例说明。可以理解的是，每个光腔是由间隔一段距离且相互平行的两个光腔镜面形成的。

可选的，参照图 8 和图 9 所示，第一光腔 91、第二光腔 92 与离子阱系统中各电极对的位置关系也可以解释如下：

第二光腔 92 的两个光腔镜面与上述中心线 100 的距离相同，上述接地电极对 94 的两个接地电极与射频电极对 95 的两个射频电极对称分布在中心线 100 的两侧，直流电极对 93 的两个直流电极的连线与上述中心线 100 平行。

可选的，在一种可能实现方式中，第二光腔 92 的两个光腔镜面的连线与中心线 100 具有夹角，该夹角大于 0 度且小于 180 度。

可选的，上述接地电极对 94 中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，该夹角大于 0 度且小于 180 度。

参照上述图 8 和图 9 所示，第二光腔 92 的两个光腔镜面以上述中心线 100 为中心对称分布（即，第二光腔 92 的两个光腔镜面相同位置的连线与中心线 100 垂直），该第二光腔 92 的一个光腔镜面位于上述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，第二光腔 92 的另一个光腔镜面位于另一个接地电极和与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

可选的，在下述具体实施例中，以中心线 100 所在的方向（即，平行于中心线 100 的方向）为 Z 方向，也称为轴向，与中心线 100 垂直的方向为 XY 方向，也称为径向，或垂直于轴向。

可选的，在离子光腔耦合系统所在的空间中，假设射频电极对 95 设置在 Y 方向，接地电极对 94 设置在 X 方向，因而，可以在 XY 方向形成马鞍形电势能来囚禁离子。在 Z 方向的电极对施加的是直流电信号，因而可以称为直流电极对 93，该直流电极对 93 用于在 Z 方向束缚离子。

可选的，接地电极对 94 的每个接地电极和射频电极对 95 的每个射频电极呈间隔分布，且接地电极对 94 的两个接地电极和射频电极对 95 的两个射频电极分别以中心线 100 为中心对称分布。

可选的，在离子阱系统中的上述至少一个离子的平衡位置所在直线中，与第一光腔的两个光腔镜面垂直的直线为中心线 100。假设，该中心线 100 所在的方向为 Z 方向，该第一光腔 91 的两个光腔镜面分别位于直流电极对 93 的两个直流电极的内侧。该第一光腔 91 可以用于获取外部的量子光信号，进而将其发送到离子阱系统中，以使量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中。

可选的，第二光腔 92 与上述中心线 100 具有夹角，在一种可能实现方式中，第二光腔 92 的两个光腔镜面相同位置的连线可以垂直于中心线 100，即第二光腔 92 可以垂直于 Z 方向进行设置，或者第二光腔 92 的两个光腔镜面相同位置的连线可以与中心线 100 成 30 度、45 度、60 度等不同的夹角。关于该夹角的具体取值可以根据实际情况确定，本申请实施例并不对其进行限定。

该第二光腔 92 位于接地电极对 94 和射频电极对 95 之间，即，第二光腔 92 的一个光腔镜面分布在接地电极对 94 的一个接地电极和相邻射频电极对 95 的一个射频电极形成的夹角中，第二光腔 92 的另一个光腔镜面位于接地电极对 94 的另一个接地电极和射频电极对 95 的另一个射频电极形成的夹角中。该第二光腔 92 可以用于获取该离子阱系统中单个离子的量子信息。

图 8 和图 9 示例性的给出了 1 个第一光腔 91、2 个第二光腔 92、1 个直流电极对 93、1 个接地电极对 94、1 个射频电极对 95、离子阱系统中轴向排列有 8 个离子以及第二光腔 92 的两个光腔镜面的连线垂直于中心线 100 进行说明。值得说明的是，第二光腔 92 的数量可以等于或小于离子阱系统中离子的数量，而离子的数量不局限于 8 个，其可以有上百个，甚至更多。因而，本申请实施例中的第二光腔 92、直流电极对 93、接地电极对 94、射频电极对 95 以及离子的具体数量均可以根据实际情况进行设定，本申请实施例并不对其进行限定。

可选的，在申请实施例中，该离子光腔耦合系统被设置在一个真空腔体中，当该离子光腔耦合系统被放置在该真空腔体中后，可以由真空泵组将其抽真空。真空腔体中的离子光腔耦合系统的各个电极均通过引线与外面电源连接。

离子阱系统中的直流电极对 93 中通入的直流电信号由电压源产生的信号经过放大器的放大产生，射频电极对 95 中通入的交流电信号由信号源产生的信号经过放大器的放大产生。

可选的，在本申请实施例中，离子阱系统中被囚禁的上述至少一个离子可以沿着 Z 轴方向排列，也即，这些至少一个离子可以排列在直流电极对 93、接地电极对 94 和射频电极对 95 形成的空间中。

可选的，对于上述至少一个离子，每两个离子之间的间距大约为 5nm（微米）。上述每个离子一般选用元素周期表中碱土族（即土族）的金属元素，例如，钙（Ca）、铍（Be）；或者，上述每个离子可以选用核外带两个电子的过度金属元素，例如，镱（Yb）、镉（Cd）。由于中性原子是不能感受电场力的，所以，选用的金属元素需要用激光将原子外部的电子激发，并使其从原子核上脱落，形成离子。

值得说明的是，离子选用的元素可以不同，因而，对于选择的不同元素，需要选择不同波长的激光器，并利用不同波长的激光器发射的激光来激发元素外部的电子，进而实现核外电子的剥离。例如，当选用碱土族中的金属元素钙时，需要利用波长为 423nm 和波长为 375nm 的激光器同时作用钙原子，以得到钙离子。

由上述可知，离子阱系统的直流电极对 93 可以在 Z 方向束缚离子阱系统中的离子。该直流电极对 93 以两个相对的直流（DC）电极的形式加在第一光腔 91 的两端。该直流电极对 93 的两个直流电极之间的距离一般在几个毫米量级，电压一般在几十伏特量级。这样的电极构架可以在 Z 方向产生 100KHz 大小的谐振束缚电势场。离子阱系统在 XY 方向分别是射频电极对 95（两个射频交流 RF 电极）和接地电极对 94（两个接地 GND 电极）。每对电极之间的间距大约为 2 毫米，射频交流的频率可选的在 20-50MHz，电压一般为上百伏特。因而，根据上述参数计算，可以在 XY 方向产生 1MHz 大小的谐振束缚电势场。这样在三个方向都产生了束缚势场，可以同时三个方向囚禁离子。

可选的，在离子阱系统中，每个形式的电极一般都由钨丝做成，并拉直为圆柱型，直径在 1 毫米左右。

可选的，在本申请的实施例中，在离子阱系统中的离子数量为至少两个时，第一光腔 91 和第二光腔 92 的束腰半径需要满足如下条件：

该第一光腔 91 的束腰半径大于至少两个离子中相邻两个离子的间距，第二光腔 92 的束腰半径小于或等于至少两个离子中相邻两个离子的间距。

这样，第一光腔 91 可以与离子阱中所有离子耦合，第二光腔 92 可以定位并获取到离子阱系统中的单个离子。

具体的，第一光腔 91 和第二光腔 92 分别分布于 Z 方向和垂直于 Z 方向。在 Z 方向，第一光腔 91 的第一光腔镜面镀第一反射膜，第二光腔镜面镀第二反射膜，该第一光腔 91 用于读入和存储量子光信号。第一光腔 91 的两个光腔镜面之间的距离大约为 1 毫米，束腰半径可以为 50 微米左右。在 XY 平面（垂直于 Z 方向），第二光腔 92（数量为一个或到多个）的第一光腔镜面镀第一反射膜，第二光腔镜面镀第二反射膜，该第二光腔 92 用于读出囚禁离子的量子信息。第二光腔 92 的两个光腔镜面之间的距离约为 300 微米左右，束腰半径可以到 5 微米左右。与两个离子的间距相比较，第二光腔 92 的束腰半径可以达到相同的水平，如果按照两离子间距为 5 微米计算，束腰半径为 5 微米的第二光腔 92 可以作用到单个离子上面，进而可以实现寻址单离子以及获取单个离子的目的。

可选地，在离子数大于 2 时，相邻的离子间隔相同。

在本申请的实施例中，第一光腔 91 用于获取量子光信号并将该量子光信号发送至离子阱系统中，以使量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中，具体为：

该第一光腔 91 用于将获取到的量子光信号发送至离子阱系统中，使该量子光信号被离子阱系统中的上述至少一个离子吸收后，该量子光信号的量子信息依次转移到这些至少一个离

子的集体激发态和整体谐振模激发态中，该量子信息再从整体谐振模激发态中转移到离子阱系统的单个离子的激发态中。

可选的，在本申请实施例的离子光腔耦合系统中，第一光腔 91 从外界获取到量子光信号，并将其发送至离子阱系统中时，离子阱系统中的上述至少一个离子吸收量子光信号后，使得这些离子从基态变为集体激发态，因而，该量子光信号的量子信息首先转移到这些离子的集体激发态中，具体的，用 $|0\rangle = |0_1 0_2 \dots 0_N\rangle \rightarrow |1\rangle = \sum_i g_i |0_1 0_2 \dots 1_i \dots 0_N\rangle$ 表示，其中， $|0\rangle$ 表示离子阱系统中的所有离子整体处于基态， $|0_1 0_2 \dots 0_N\rangle$ 表示离子阱系统中包括的 1-N 个离子分别处于基态， $|1\rangle$ 表示离子阱系统中的离子处于集体激发态， $\sum_i g_i |0_1 0_2 \dots 1_i \dots 0_N\rangle$ 表示当量子光信号被上述至少一个离子吸收后，量子光信号的量子信息转移到了上述至少一个离子的集体激发态中，此时，量子信息可以在上述至少一个离子中的任何一个离子中，且可以在上述至少一个离子中相互转移，且 $0 \leq i \leq N$ ， i 为整数， g_i 表示离子阱系统中每个离子与第一光腔 91 的耦合强度。

其次，量子光信号的量子信息再从离子的集体激发态转移到离子的整体谐振模激发态。详见图 10。图 10 为离子耦合到光腔的时能级结构的变化示意图。如图 10 所示，左侧为离子本身的能级结构，可以用双色拉曼虚过程实现离子从基态到激发态的能级跃迁，右侧为离子阱系统的谐振模能级结构，其能量间隔远远小于离子能级之间能量间隔，所以，离子阱系统也可以用受激拉曼过程来实现状态转移，即 $|1, n_{ph} = 0\rangle \rightarrow |0, n_{ph} = 1\rangle$ ，其中， n_{ph} 代表离子的谐振模式，0 代表基模，1 代表激发模，因而， $|1, n_{ph} = 0\rangle$ 中的 1 表示离子阱系统中的离子处于集体激发态， $n_{ph} = 0$ 表示离子阱系统中的没有离子处于整体谐振模激发态，而 $|0, n_{ph} = 1\rangle$ 中的 0 表示离子阱系统中没有离子处于集体激发态， $n_{ph} = 1$ 表示离子阱系统中的离子处于整体谐振模激发态，所以， $|1, n_{ph} = 0\rangle \rightarrow |0, n_{ph} = 1\rangle$ 表示光子的量子信息从至少一个离子的集体激发态转移到整体谐振模激发态。由此，离子阱中的所有离子回到基态。

最后，光子的量子信息再从至少一个离子的整体谐振模激发态转移回到单个离子的激发态中，即 $|0, n_{ph} = 1\rangle \rightarrow |0_1 \dots 1_j \dots 0_N, n_{ph} = 0\rangle$ ，光子的量子信息转移回到第 j 个离子中，其中， $0 \leq j \leq N$ ， j 为整数。

因而，在本实施例中，当量子信息从外部量子光信号转移到离子阱系统的离子上之后，就可以在离子串内部进行运算，从而使该量子信息转移到单个离子的激发态中（即离子串中某个离子的状态变为激发态，也可以是某个离子变为叠加态，而其余离子处于基态，本实施例中以一个离子变为激发态进行说明）。可选的，单个离子的激发态可以表示为： $\cos \alpha |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |1\rangle$ 。

可选的，在本申请的实施例中，第二光腔 92 用于获取离子阱系统中单个离子的量子信息，具体可以解释如下：

该第二光腔 92 用于通过激光定位离子阱系统中的单个离子，获取该单个离子的量子信息。

可选的，在本申请的实施例中，离子之间的间距一般为 5 微米，而第二光腔 92 的束腰半径也可以达到相同的水平，所以，可以利用激光通过第二光腔 92 来定位离子阱系统中的离子，而且实现单独耦合到离子阱系统中的单个离子而不影响其他离子状态的目的，所以，该第二光腔 92 可以获取离子阱系统中的该单个离子的量子信息，也可以说实现了单个离子寻址的功能。

可选的，在本申请实施例所示的离子阱系统中，第一光腔 91 与上述至少一个离子中任一离子的耦合强度、第二光腔 92 与上述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，该 g_0 可以通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为该第一光腔 91 或第二光腔 92 的长度， ω_0 为第一光腔 91 或第二光腔 92 的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为离子的自发辐射率。由该公式可知，光腔的体积越大，即光的腔长度越长、光腔的束腰半径越大，则光腔与离子之间的耦合强度越弱。

可选的，为了判断光腔与离子的耦合是否为相干耦合，即耦合强度是否远远大于光腔和离子本身的损耗，本申请实施例中，引入了参数 C ，用于表示光腔与离子之间是否为强耦合。示例性的，利用 $C = \frac{g^2}{2k\gamma} \gg 1$ 表示强耦合。即，如果 C 远远大于 1，则表示光腔与离子的耦合强度远远大于光腔和离子本身的损耗，此时，光与离子之间的作用解释为相干操作，即量子信息在量子光信号与离子的传递过程中不会引入错误。

可选的， $C = \frac{g^2}{2k\gamma}$ 中的 g 为光腔与离子的耦合强度， γ 为离子的自发辐射率，即离子本身的损耗， k 为光腔本身的损耗，其中， $k = \frac{2\pi c}{4LF}$ ， F 表示光腔的精细度， L 为光腔的长度， c 为光速。

示例性的，在实际应用中，第一光腔 91 的典型实验数值为 $(g, k, \gamma) = 2\pi \times (1.4, 0.05, 11.4)$ MHz，将其带入 $C = \frac{g^2}{2k\gamma}$ ，可以得到 $C=1.7$ ，因而，在典型的实验数值下，第一光腔 91 与离子耦合强度并不能满足远远大于光腔和离子本身损耗的条件，这种情况下，第一光腔 91 与离子的耦合是非相干的。但是，如果将第一光腔 91 在离子阱系统的轴向和离子串耦合，该第一光腔 91 则可以耦合到多个离子，这时第一光腔 91 与离子的耦合强度会随着离子数目的增加而增大。

可选的，在本申请的实施例中，第一光腔 91 与离子阱系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示： $g_N = \sqrt{N}g_0$ ，其中， N 为离子阱系统中离子的总数量。

可选的，利用实验中的典型参数，取 $N=53$ ， $g_0 = 2\pi \times 1.4$ MHz，此时， $g_N = 2\pi \times 10.2$ MHz，相应的， $(g, k, \gamma) = 2\pi \times (10.2, 0.05, 11.4)$ MHz，所以， $C_N=91$ 。此时，得到的第一光腔 91 与离子的耦合强度远远大于光腔和离子本身损耗的条件，实现了第一光腔 91 与离子在离子阱系统的轴向的相干耦合。

可选的，对于较小的光腔，即长度和束腰半径均较小的第二光腔 92，可选的，第二光腔 92 的长度 $L=100\mu\text{m}$ ，束腰半径 $\omega_0 = 4\mu\text{m}$ 。当离子阱系统中的单个离子与第二光腔 92 耦合时，该第二光腔 92 与单个离子的耦合强度可以用 $g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$ 表示。

示例性的，当第二光腔 92 的长度 $L=100\mu\text{m}$ ，束腰半径 $\omega_0 = 4\mu\text{m}$ 时，在实际应用中，可以估算出 $(g, k, \gamma) = 2\pi \times (6.3, 0.1, 11.4)$ MHz，相应的，可以得到 $C = 17.5$ 。

由此可知，当利用第二光腔 92 时，不需要离子与第二光腔 92 的整体增强就可以达到强耦合，即第二光腔 92 与离子的耦合强度也远远大于第二光腔 92 和离子自身的损耗。通过第二光腔 92 和离子的耦合，并且从第二光腔 92 外部入射双色拉曼光束可以再将单个离子激发态中的量子信息转移为量子光信号的量子信息，从而从离子阱中读出。

本申请实施例提供的离子光腔耦合系统，利用第一光腔获取量子光信号，将该量子光信号发送至离子阱系统中，量子光信号的量子信息被离子阱系统中的至少一个离子吸收，转移到上述至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态，即转移到离子内部的电子状态，最后再经过量子计算处理，量子信号最后转移到离子阱中单个离子的激发态中，最后再利用第

二光腔定位到单个离子，并通过量子光信号的量子信息发射出去。该技术方案，量子光信号从第一光腔中进入离子阱系统，并且从第二光腔中射出，提高了离子与光子的量子态转移效率。

该实施例中，第一光腔 91、第二光腔 92 与离子的耦合都是强耦合，实现了完全相干的量子态转移。

可选的，在本申请实施例提供的离子光腔耦合系统中，第一光腔 91 的一个光腔镜面和第二光腔 92 的一个光腔镜面均镀第一反射膜，第一光腔 91 的另一个光腔镜面和第二光腔 92 的另一个光腔镜面均镀第二反射膜，该第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，该第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，且第一预设范围的最大值小于第二预设范围的最小值。

可选的，在本实施例中，量子光信号从第一光腔 91 的第一光腔镜面入射到离子阱系统中，该第一光腔镜面上镀有第一反射膜，可选的，该第一反射膜的反射率不能太高（例如，99% 附近比较合适），这样，可以使量子光信号比较容易从第一光腔 91 入射到离子阱系统中，量子光信号和离子阱系统中的离子相互作用（被离子吸收），未能被离子吸收的光传输到第一光腔 91 的第二光腔镜面处，该第二光腔镜面上镀有第二反射膜，可选的，该第二反射膜的反射率越高越好（可选的，一般在 99.99% 以上），这样，传输到第一光腔 91 的第二光腔镜面的量子光信号被反射回离子阱系统中继续与离子相互作用，所以，量子光信号可以在第一光腔 91 的两个光腔镜面之间来回反射，反复与离子相互作用，从而增加了量子光信号与离子阱系统中离子的相互作用概率，即，量子光信号能够充分被离子阱系统中的离子所吸收。离子吸收量子光信号后，量子光信号的量子信息首先转移到离子阱系统中所有离子的集体激发态，再转移到整体谐振模激发态（整体谐振运动模式的激发态），最后再通过寻址单个离子将量子信息从离子整体谐振模激发态转移到单个离子的激发态中（内部量子态），这样量子光信号的量子信息通过第一光腔 91 转移到了离子阱系统的单个离子的激发态中。

可选的，由于第二光腔 92 的第一光腔镜面镀第一反射膜，第二光腔 92 的第二光腔镜面镀第二反射膜，所以，离子阱系统中的单个离子均可以通过镀第一反射膜的第一光腔镜面被激光寻址，即利用第二光腔 92 可以通过激光作用寻址单个离子，进而将单个离子的量子信息通过第二光腔 92 转移到光子的量子态中，最后通过第二光腔 92 的第一光腔镜面将光子的量子状态从离子阱系统中读出。通过第一光腔 91 和第二光腔 92 的作用，实现了量子光信号（的量子信息）的读入读出，实现了离子中的信息的传递。

示例性的，结合上述内容，下述为本申请实施例的技术方案进行详细说明。

图 11 为量子光信号在离子光腔耦合系统中的传输示意图。下述首先详细介绍离子光腔耦合系统中各部分的作用。本实施例以常用的 XYZ 空间分布进行说明。如图 11 所示，该光腔耦合系统以包括 1 个第一光腔 91、4 个第二光腔 92、1 对直流电极对 93、1 对射频电极对 95 和 1 对接地电极对 94 进行说明。

可选的，如图 11 所示，第一光腔 91 的两个光腔镜面中心的连线与 Z 轴平行，第一光腔 91 的两个光腔镜面的制作材料可以是二氧化硅，第一光腔 91 的每个光腔镜面被抛光，并镀上反射膜，使其能够反射紫外光。可选的，第一光腔 91 的两个光腔镜面之间的距离约为 2 毫米，形成的第一光腔 91 的束腰半径大约为 100 微米。

可选的，第二光腔 92 的两个光腔镜面中心的连线与 Z 轴垂直。每个第二光腔 92 可以由

光纤制成，可以称为光纤光腔，多个第二光腔 92 组成光纤光腔阵列，光纤光腔阵列中每个第二光腔 92 在同一时刻可以对应一个离子 96，而在不同时刻，该第二光腔 92 还可以用于对应另一个离子（图中只画了四个第二光腔 92，实际上，第二光腔 92 的数量可以为大于或等于 1 且小于或等于离子总数量的整数）。实际应用中，第二光腔 92（光纤光腔）可以由标准的裸光纤制作而成，也可以由模式与光模式一致的光纤做成。

例如，当采用标准的紫外光纤制作第二光腔 92 时，可选的，首先利用二氧化碳激光器聚焦到光纤断面表面，加工出需要的光纤断面半径。比如，制成球面半径为 150 微米的第二光腔 92，束腰半径的典型值可以做到 5 微米，每两个第二光腔 92 之间的间距为 300 微米（即第二光腔 92 的两个光腔镜面的距离）。

可选的，离子阱系统的电势主要由 6 个不同电压和方向的电极实现。在第一光腔 91 的两个光腔镜面中心连线的方向（Z 方向）放置有一个直流电极对 93，直流电极对 93 中的两个直流电极之间的距离在几个毫米（可选为 3 毫米），每个直流电极加上相同的直流电压，根据需要的电势不同，可以选取 10V-50V。本实施例中，由于需要在 Z 方向弱囚禁离子，所以选取较小的电压。可选的，可以在每个直流电极上施加 20V 的电压，这样可以在 Z 方向产生 100KHz 大小的囚禁势能。

相应的，在垂直于第一光腔 91 的两个光腔镜面中心连线的方向（在 XY 方向）分别放置一个射频电极对 95 和一个接地电极对 94，射频电极的施加电压一般为 200V-500V 的高压，频率为 30-40MHz。可选的，在本申请实施例中，可以选用 35MHz 的交流信号和 300V 的交流电压实现。射频电极对 95 中的两个射频电极和接地电极对 94 中的两个接地电极之间的距离可以为 1 毫米，这样，可以在 XY 方向上产生 1MHz 大小的囚禁势能。

可选的，射频电极对 95 和接地电极对 94 可以由钨丝拉直成圆柱形，直流电极对 93 的尖端可以由圆柱电极通过电化学腐蚀的方法制作而成，具体的，可以通过控制电化学腐蚀的速度来控制直流电极对 93 中每个直流电极的尖端角度。

可选的，图 11 中的离子光腔耦合系统需要放置在超导真空腔体里面，用真空泵将其抽为真空，真空度达到 10^{-11} 毫巴（mbar）。该系统中的所有电信号由外部电源通过真空引线接入真空电极实现，射频电信号通过对应频率的微波源产生，由于微波源不能产生 300V 这么高的电压，所以，利用一个外部的射频放大器来实现电压放大的功能，例如，采用螺旋共振器（helical resonator）来实现这个功能。直流电信号可以通过一个电压源产生，进而经过一个功率放大器得到大小为 20V 的直流信号。

可选的，在本实施例中，利用电流源给放置了对应原子的金属管通电流来加热该原子，使得原子蒸发喷射出金属管，再通过离子化的激光作用于喷射的原子束，以打掉原子外部的电子，得到离子，得到的离子能够感受到外部的电场，从而，在离子阱系统中规则排布形成一维链状结构。

可选的，当离子光腔耦合系统中的所有电学信号和真空状态已经达到要求后，该系统就可以开始获取外部的量子光信号，使得量子光信号从第一光腔 91 的第一光腔镜面入射，透过该第一光腔镜面后和离子阱系统中的离子串相互作用。

在本实施例中，量子光信号的波长和离子的能级间隔完全相同，并且和第一光腔 91 的某个光场模式也完全相同，所以，会有共振增强的效应，使得量子光信号的吸收增强。当离子吸收了量子光信号后，会把量子光信号的量子信息相干地转移到离子的集体激发态上，即 $|0\rangle = |0_1 0_2 \dots 0_N\rangle \rightarrow |1\rangle = \sum_i g_i |0_1 0_2 \dots 1_i \dots 0_N\rangle$ ，再通过双色拉曼激光把量子信息从离子集体

激发态转移到离子的整体谐振模激发态中，即 $|1, n_{ph} = 0\rangle \rightarrow |0, n_{ph} = 1\rangle$ ，最后，仍然使用双色拉曼激光的方法，将量子信息从离子的整体谐振模激发态转移到单个离子的激发态中，即 $|0, n_{ph} = 1\rangle \rightarrow |0_1 \dots 1_j \dots 0_N, n_{ph} = 0\rangle$ ，从而完成了离子串的量子信息相干吸收过程。

可选的，在完成了离子的量子信息吸收过程后，该离子阱系统中的离子可以根据吸收的量子信息继续做量子信息处理，在完成了某个量子信息的处理任务后，进而将得到的量子信息保存到某个离子的激发态中。在需要读出时候，可以直接将离子的激发态通过对应的第二光腔 92 转移到光子的量子态中，即 $(\cos \alpha |s\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |s'\rangle) \otimes |0\rangle \rightarrow |D\rangle \otimes (\cos \alpha |H\rangle + e^{i\varphi} \sin \alpha |V\rangle)$ ，从而从离子阱系统中读出。

综上，该离子光腔耦合系统实现了量子光信号的接收、量子光信号的量子信息处理以及和量子光信号的读出。

本申请实施例中采用第一光腔和第二光腔来耦合离子，实现了单个离子的寻址。此外，由于第二光腔有极小的束腰半径，因而，可以只作用在单个离子上而不影响其他离子的状态，第一光腔实现了离子和光腔的耦合强度增强，并且在这种结构下，同时实现了光腔与离子的强耦合和单个离子寻址。

此外，该光腔耦合系统的最大优势是没有可移动的光学元件。但是，由于前面提到离子会在离子阱系统中做谐振运动，特别是微运动会改变离子的平衡位置，使得离子不再位于第二光腔的中心位置： $r_i(t) \approx \bar{r}_i \cos(\omega_i t) (1 + \frac{q_i}{2} \cos(\Omega_{RF} t))$ ，这种情况下，可以通过调节外部补偿电极的电压最小化离子的微运动，即使得 q_i 尽可能接近 0，这样可以使得需要传输量子信息的通信离子位于第二光腔的中心，从而提高了耦合效率。

本申请实施例的离子光腔耦合系统分别利用不同的光腔耦合离子，并获取和读出量子光信号，避免了用同一个光腔读入读出带来的一半损耗，其次，该系统同时实现了离子与光腔的耦合强度增强和单个离子寻址，而且降低了该系统中量子光信号的读入读出操作复杂度。

进一步的，图 12 为本申请实施例提供的离子光腔耦合方法实施例的流程示意图。该离子光腔耦合方法适用于离子光腔耦合系统，该离子光腔耦合系统包括：第一光腔、第二光腔，以及离子阱系统，该离子阱系统，包括：直流电极对、接地电极对和射频电极对。其中，该离子阱系统中排列有至少一个离子，至少一个离子的平衡位置所在直线为中心线，该中心线与第一光腔的两个光腔镜面垂直；第一光腔的两个光腔镜面对称分布在至少一个离子的两侧，第二光腔的两个光腔镜面分布在第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中，且第二光腔与该中心线具有夹角。直流电极对的两个直流电极对称分布在第一光腔的两个光腔镜面的外侧，接地电极对和射频电极对分布在第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中。

可选的，参照图 12 所示，该离子光腔耦合方法可以包括如下步骤：

步骤 121：利用第一光腔获取量子光信号，并将获取到的量子光信号发送至离子阱系统中，该量子光信号携带量子信息。

可选的，在本申请的实施例中，第一光腔通过一个光腔镜面获取外界的量子光信号，该光腔镜面上镀有第一反射膜，该第一反射膜可以允许量子光信号通过，因而，第一光腔可以将获取到的量子光信号发送至离子阱系统中。由于本申请实施例中需要利用量子光信号的量子信息实现离子中信息的转移，所以，该量子光信号携带有量子信息。

步骤 122：利用第一光腔和离子阱系统，将上述量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中。

其中，该离子阱系统的直流电极对、接地电极对和射频电极对形成的空间中且在中心线上排列有至少一个离子。

可选的，在本申请实施例中，量子光信号通过第一光腔的一个光腔镜面入射到离子阱系统中，离子阱系统的直流电极对、接地电极对和射频电极对形成的空间中且在中心线上排列有至少一个离子，所以，入射到离子阱系统中的量子光信号可以和离子阱系统中的离子相互作用（被离子吸收），未能被离子吸收的光传输到第一光腔的另一个光腔镜面处，该光腔镜面上镀有第二反射膜，该第二反射膜可以阻止量子光信号从该光腔镜面射出离子阱系统。

这样，鉴于离子阱系统中直流电极对、射频电极对以及接地电极对产生的囚禁作用，量子光信号可以在第一光腔的两个光腔镜面之间来回反射，反复与离子相互作用，从而增加了量子光信号与离子阱系统中离子的相互作用概率。

具体的，该步骤 122（利用第一光腔和离子阱系统，将上述量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中）具体可以解释为如下：

利用第一光腔和离子阱系统的囚禁作用，使量子光信号被离子阱系统中的至少一个离子吸收；其中，该量子光信号的量子信息依次转移到至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再从该整体谐振模激发态中转移到离子阱系统的单个离子的激发态中。

可选的，离子阱系统中的上述至少一个离子吸收量子光信号后，使得这些离子的从基态变为集体激发态，因而，该量子光信号的量子信息首先转移到至少一个离子的集体激发态中，离子阱系统中离子之间相互作用，量子光信号的量子信息再从离子的集体激发态转移到离子的整体谐振模激发态，最后再从离子的整体谐振模激发态转移回到单个离子的激发态中。

步骤 123：利用第二光腔获取离子阱系统中单个离子的量子信息。

可选的，在本申请的实施例中，第二光腔的束腰半径与两个离子之间的间距可以达到相同的水平，所以，可以利用该第二光腔获取离子阱系统中单个离子的量子信息。

具体的，该步骤 123（利用第二光腔获取离子阱系统中单个离子的量子信息）具体可以解释为如下步骤：

步骤 A1：利用激光通过第二光腔，定位上述离子阱系统中的单个离子。

步骤 A2：利用第二光腔，获取上述单个离子的量子信息。

可选的，由于第二光腔的束腰半径可以做到与两离子间距的水平，所以，可以利用激光通过第二光腔定位到离子阱系统中的单个离子，进而实现单独耦合到离子阱系统中的单个离子而不影响其他离子状态的目的，所以，该第二光腔可以获取离子阱系统中的该单个离子的量子信息，也可以说实现了单个离子寻址的功能。

可选的，关于本申请实施例提供的离子光腔耦合方法中未披露的信息可以参见上述图 8 至图 11 所示的离子光腔耦合系统中的介绍，此处不再赘述。

本申请实施例提供的离子光腔耦合方法，首先利用第一光腔获取量子光信号，并将获取到的量子光信号发送至离子阱系统中，该量子光信号携带量子信息，其次利用第一光腔和离子阱系统，将上述量子光信号的量子信息转移到离子阱系统的单个离子中，最后再利用第二光腔获取离子阱系统中单个离子的量子信息。该技术方案中，量子光信号从第一光腔进入离子阱系统，并且从第二光腔取出，避免了用同一个光腔读入读出带来的一半损耗，提高了离子与光子的量子态转移效率。

可选的，在本申请实施例的一种可能实现方式中，在上述离子阱系统中，第一光腔与上

述至少一个离子中任一离子的耦合强度、第二光腔与上述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，所述 g_0 通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为第一光腔或第二光腔的长度， ω_0 为第一光腔或第二光腔的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为单离子的自发辐射率。

可选的，第一光腔与离子阱系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示：

$$g_N = \sqrt{N}g_0$$

其中，该 N 为离子阱系统中离子的总数量。

可选的，在本申请实施例的另一种可能实现方式中，第一光腔的第一光腔镜面和第二光腔的第一光腔镜面均镀第一反射膜，该第一光腔的第二光腔镜面和第二光腔的第二光腔镜面均镀第二反射膜。

其中，该第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，第一预设范围的最大值小于第二预设范围的最小值。

可选的，在本申请实施例的再一种可能实现方式中，上述第二光腔的两个光腔镜面与中心线的距离相同，接地电极对的两个接地电极与射频电极对的两个射频电极对称分布在中心线的两侧，直流电极对的两个直流电极的连线与中心线平行。

可选的，在本申请实施例的又一种可能实现方式中，该接地电极对中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，该夹角大于0度且小于180度。

该第二光腔的两个光腔镜面以上述中心线为中心对称分布，第二光腔的一个光腔镜面位于上述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，第二光腔的另一个光腔镜面位于另一个接地电极与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

可选的，在本申请实施例的又一种可能实现方式中，在上述离子阱系统中的离子数量为至少两个时，第一光腔的束腰半径大于至少两个离子中相邻两个离子的间距，第二光腔的束腰半径小于至少两个离子中相邻两个离子的间距。可选地，在离子数大于2时，相邻的离子间隔相同。

本申请实施例提供的离子光腔耦合方法，可利用上述8至图11所示离子光腔耦合系统实现，其实现原理和技术效果类似，在此不再赘述。

本文中的术语“多个”是指两个或两个以上。本文中术语“和/或”，仅仅是一种描述关联对象的关联关系，表示可以存在三种关系，例如，A和/或B，可以表示：单独存在A，同时存在A和B，单独存在B这三种情况。另外，本文中字符“/”，一般表示前后关联对象是一种“或”的关系；在公式中，字符“/”，表示前后关联对象是一种“相除”的关系。

可以理解的是，在本申请的实施例中涉及的各种数字编号仅为描述方便进行的区分，并不用来限制本申请的实施例的范围。

可以理解的是，在本申请的实施例中，上述各过程的序号的大小并不意味着执行顺序的先后，各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定，而不对本申请的实施例的实施过程构成任何限定。

权利要求书

1、一种离子光腔耦合系统，其特征在于，包括：第一光腔、第二光腔、直流电极对、接地电极对和射频电极对；

所述第一光腔包括两个光腔镜面，在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中排列有至少一个离子；

所述第二光腔的两个光腔镜面形成的空间与所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间存在交集；

所述直流电极对的两个直流电极分别分布在所述第一光腔的两个光腔镜面的外侧，所述接地电极对和所述射频电极对分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中；

所述第一光腔用于获取量子光信号，并将所述量子光信号的量子信息转移到所述至少一个离子中的单个离子中；

所述第二光腔用于获取所述单个离子中的量子信息。

2、根据权利要求1所述的系统，其特征在于，所述第一光腔用于获取量子光信号，并将所述量子光信号的量子信息转移到所述至少一个离子中的单个离子中，包括：

所述第一光腔用于将获取到的所述量子光信号发送至所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中，使所述量子光信号被所述至少一个离子吸收，所述量子光信号的量子信息依次转移到所述至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再从所述整体谐振模激发态中转移到所述单个离子的激发态中。

3、根据权利要求1所述的系统，其特征在于，所述第二光腔用于获取所述单个离子中的量子信息，包括：

所述第二光腔用于通过激光定位所述单个离子，获取所述单个离子中的量子信息。

4、根据权利要求1-3任一项所述的系统，其特征在于，所述第一光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度、所述第二光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，所述 g_0 通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为所述第一光腔或所述第二光腔的长度， ω_0 为所述第一光腔或所述第二光腔的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为离子的自发辐射率。

5、根据权利要求4所述的系统，其特征在于，所述系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示：

$$g_N = \sqrt{N}g_0$$

其中，所述 N 为所述系统中离子的总数量。

6、根据权利要求1-5任一项所述的系统，其特征在于，所述第一光腔的第一光腔镜面和所述第二光腔的第一光腔镜面均镀第一反射膜，所述第一光腔的第二光腔镜面和所述第二光腔的第二光腔镜面均镀第二反射膜，所述第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，所述第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，所述第一预设范围的最大值小于所述第二预设范围的最小值。

7、根据权利要求 1-6 任一项所述的系统，其特征在于，所述至少一个离子的数量为一个时，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述离子的平衡位置之间的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极分布在所述离子的两侧。

8、根据权利要求 1-6 任一项所述的系统，其特征在于，所述至少一个离子的数量大于 1 时，所述至少一个离子的平衡位置所在直线为中心线，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述中心线之间的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极分布在所述中心线的两侧，所述直流电极对的两个直流电极的连线与所述中心线平行。

9、根据权利要求 8 所述的系统，其特征在于，所述接地电极对中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，所述夹角大于 0 度且小于 180 度；

所述第二光腔的两个光腔镜面以所述中心线为中心对称分布，所述第二光腔的一个光腔镜面位于所述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，所述第二光腔的另一个光腔镜面位于另一个接地电极与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

10、根据权利要求 1-6 任一项所述的系统，其特征在于，所述至少一个离子的数量大于 1 时，所述第一光腔的束腰半径大于相邻两个离子的间距，所述第二光腔的束腰半径小于或等于相邻两个离子的间距。

11、一种离子光腔耦合方法，其特征在于，适用于离子光腔耦合系统，所述离子光腔耦合系统包括：第一光腔、第二光腔、直流电极对、接地电极对和射频电极对，所述第一光腔包括两个光腔镜面，在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间排列有至少一个离子；所述第二光腔的两个光腔镜面形成的空间与所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间存在交集；所述直流电极对的两个直流电极分别分布在所述第一光腔的两个光腔镜面的外侧，所述接地电极对和所述射频电极对分布在所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中；

所述方法包括：

利用所述第一光腔获取量子光信号，并将所述量子光信号发送至所述第一光腔的两个光腔镜面形成的空间中，所述量子光信号携带量子信息；

利用所述第一光腔，将所述量子光信号的量子信息转移到所述至少一个离子中的单个离子中；

利用所述第二光腔获取所述单个离子中的量子信息。

12、根据权利要求 11 所述的方法，其特征在于，所述利用所述第一光腔，将所述量子光信号的量子信息转移到所述至少一个离子中的单个离子中，包括：

利用所述第一光腔和三个电极对形成的囚禁作用，使所述量子光信号被所述至少一个离子吸收；其中，所述量子光信号的量子信息依次转移到所述至少一个离子的集体激发态和整体谐振模激发态中，再从所述整体谐振模激发态中转移到所述单个离子的激发态中。

13、根据权利要求 11 所述的方法，其特征在于，所述利用所述第二光腔获取所述单个离子中的量子信息，包括：

利用激光通过所述第二光腔，定位所述单个离子；

利用所述第二光腔，获取所述单个离子的量子信息。

14、根据权利要求 11-13 任一项所述的方法，其特征在于，所述第一光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度、所述第二光腔与所述至少一个离子中任一离子的耦合强度均用 g_0 表示，所述 g_0 通过如下公式表示：

$$g_0 = \sqrt{\frac{3c\gamma\lambda^2}{\pi^2 L \omega_0^2}}$$

其中， c 为光速， L 为所述第一光腔或所述第二光腔的长度， ω_0 为所述第一光腔或所述第二光腔的束腰半径， λ 为量子光信号的波长， γ 为单离子的自发辐射率。

15、根据权利要求 14 所述的方法，其特征在于，所述系统中的所有离子的总耦合强度 g_N 用如下公式表示：

$$g_N = \sqrt{N}g_0$$

其中，所述 N 为所述系统中离子的总数量。

16、根据权利要求 11-15 任一项所述的方法，其特征在于，所述第一光腔的第一光腔镜面和所述第二光腔的第一光腔镜面均镀第一反射膜，所述第一光腔的第二光腔镜面和所述第二光腔的第二光腔镜面均镀第二反射膜，所述第一反射膜的反射率介于第一预设范围内，所述第二反射膜的反射率介于第二预设范围内，所述第一预设范围的最大值小于所述第二预设范围的最小值。

17、根据权利要求 11-16 任一项所述的方法，其特征在于，所述至少一个离子的数量为一个时，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述离子的平衡位置之间的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极分布在所述离子的两侧。

18、根据权利要求 11-16 任一项所述的方法，其特征在于，所述至少一个离子的数量大于 1 时，所述至少一个离子的平衡位置所在直线为中心线，所述第二光腔的两个光腔镜面与所述中心线之间的距离相同，所述接地电极对的两个接地电极与所述射频电极对的两个射频电极分布在所述中心线的两侧，所述直流电极对的两个直流电极的连线与所述中心线平行。

19、根据权利要求 18 所述的方法，其特征在于，所述接地电极对中的接地电极和相邻的射频电极之间具有夹角，所述夹角大于 0 度且小于 180 度；

所述第二光腔的两个光腔镜面以所述中心线为中心对称分布，所述第二光腔的一个光腔镜面位于所述接地电极和相邻射频电极形成的夹角中，所述第二光腔的另一个光腔镜面位于另一个接地电极与相邻的另一个射频电极形成的夹角中。

20、根据权利要求 11-16 任一项所述的方法，其特征在于，所述至少一个离子的数量大于 1 时，所述第一光腔的束腰半径大于相邻两个离子的间距，所述第二光腔的束腰半径小于或等于相邻两个离子的间距。

1/6

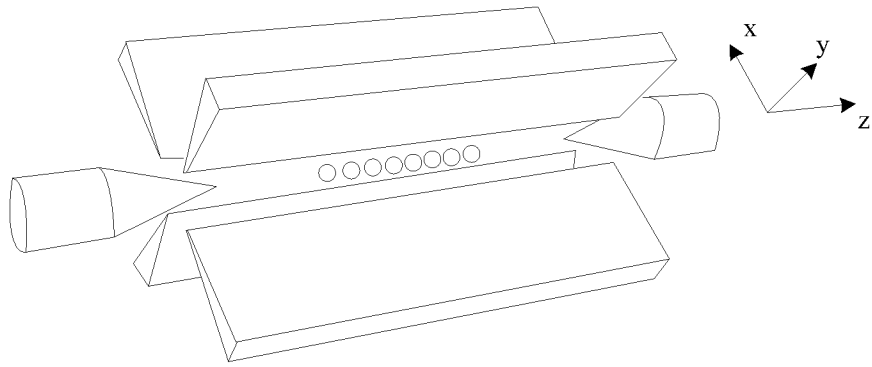


图 1

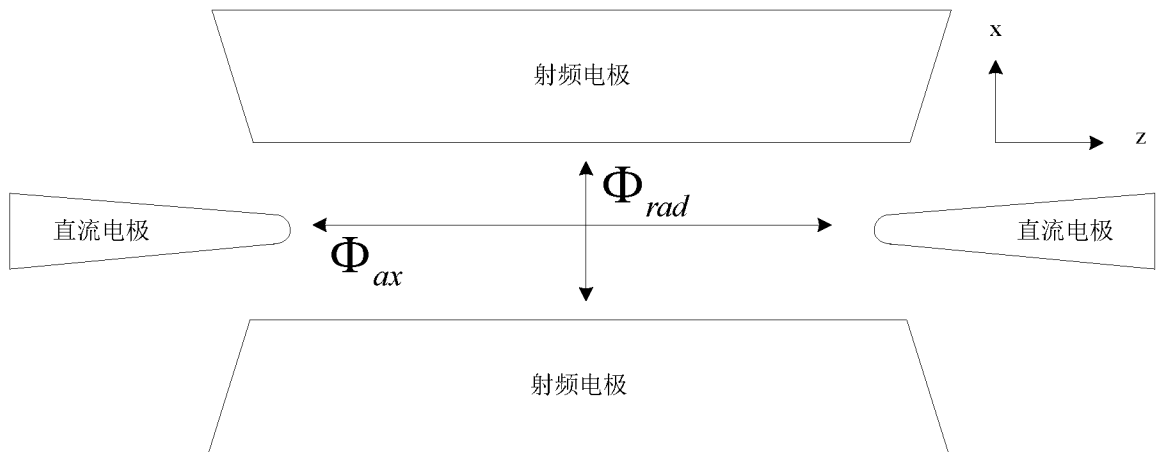


图 2

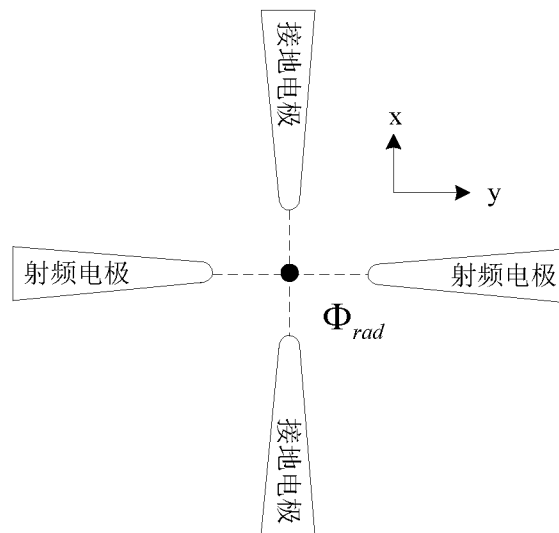


图 3

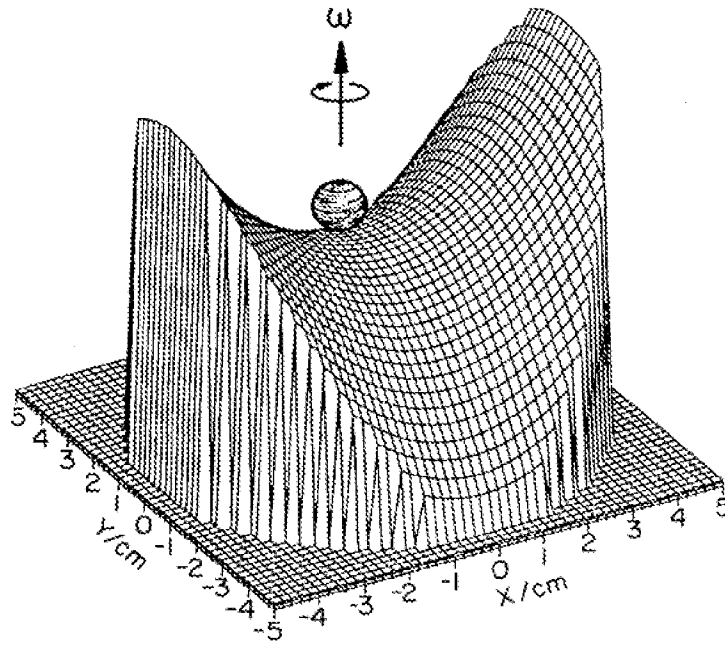


图 4

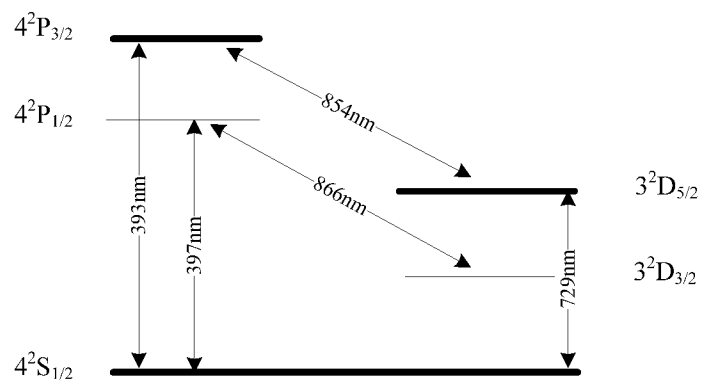


图 5

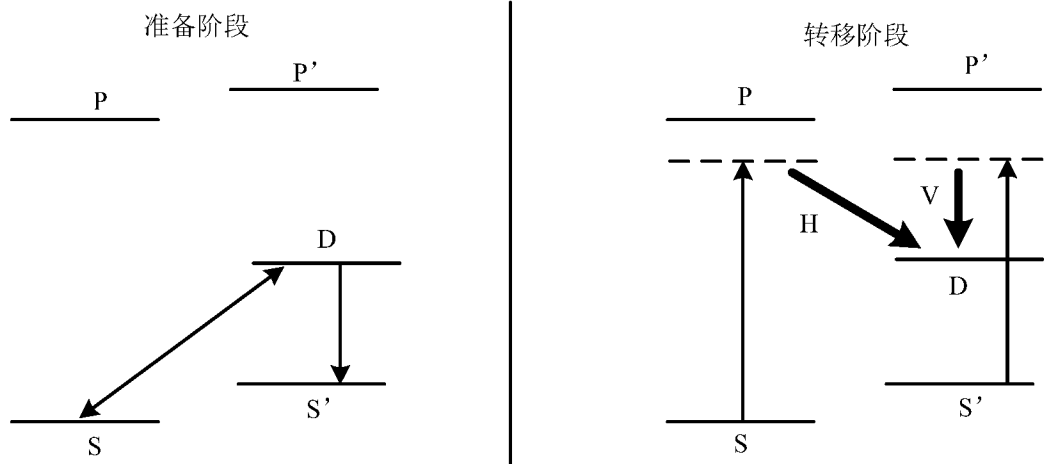


图 6

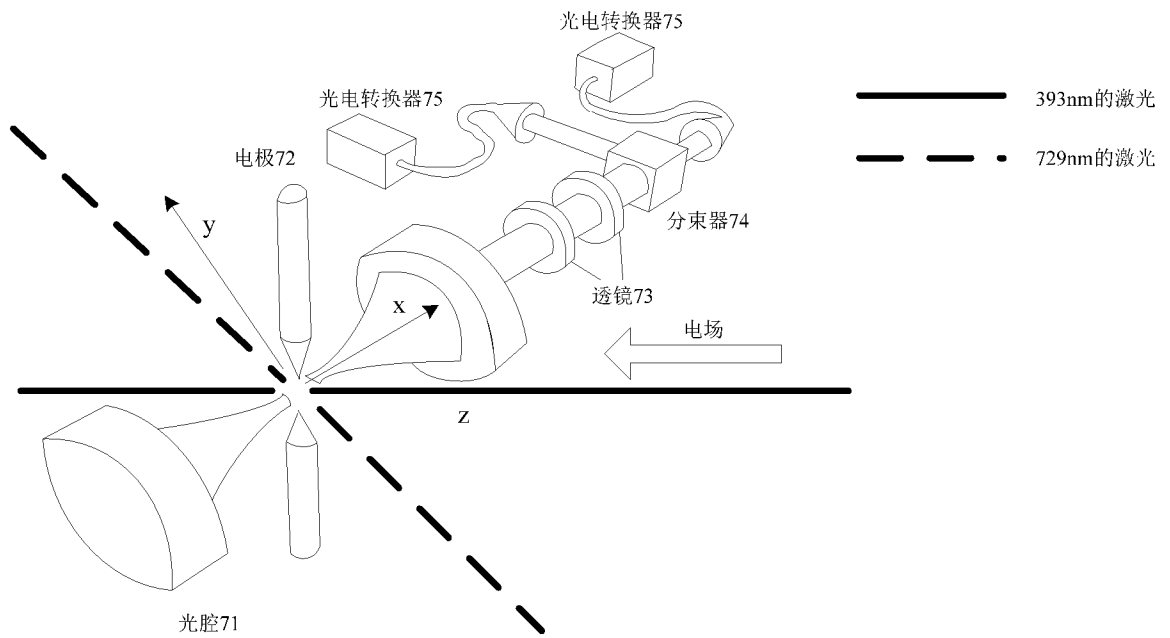


图 7

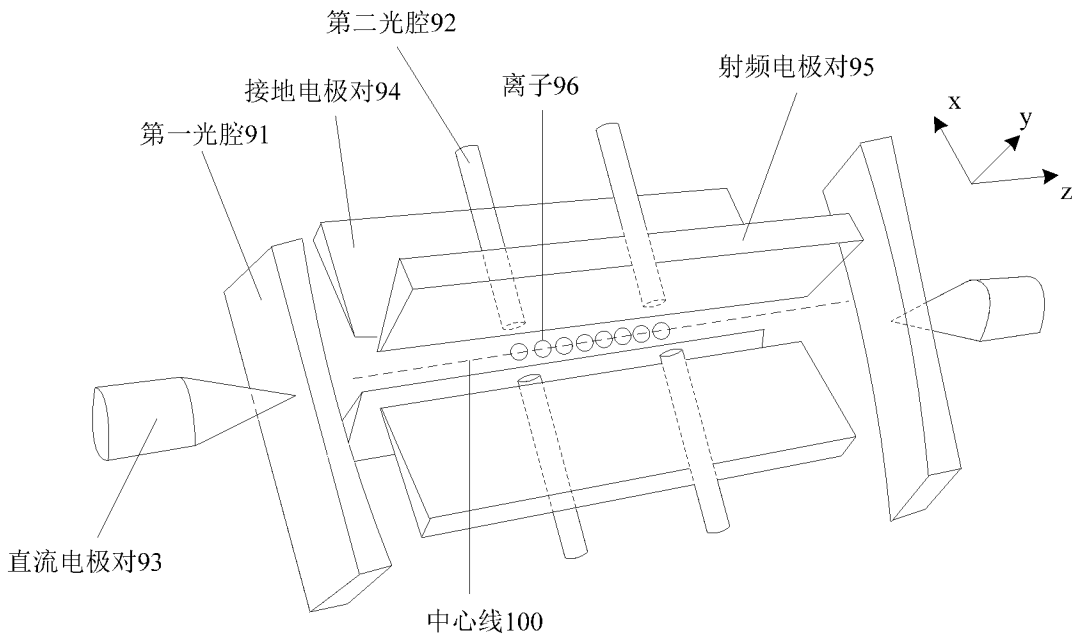


图 8

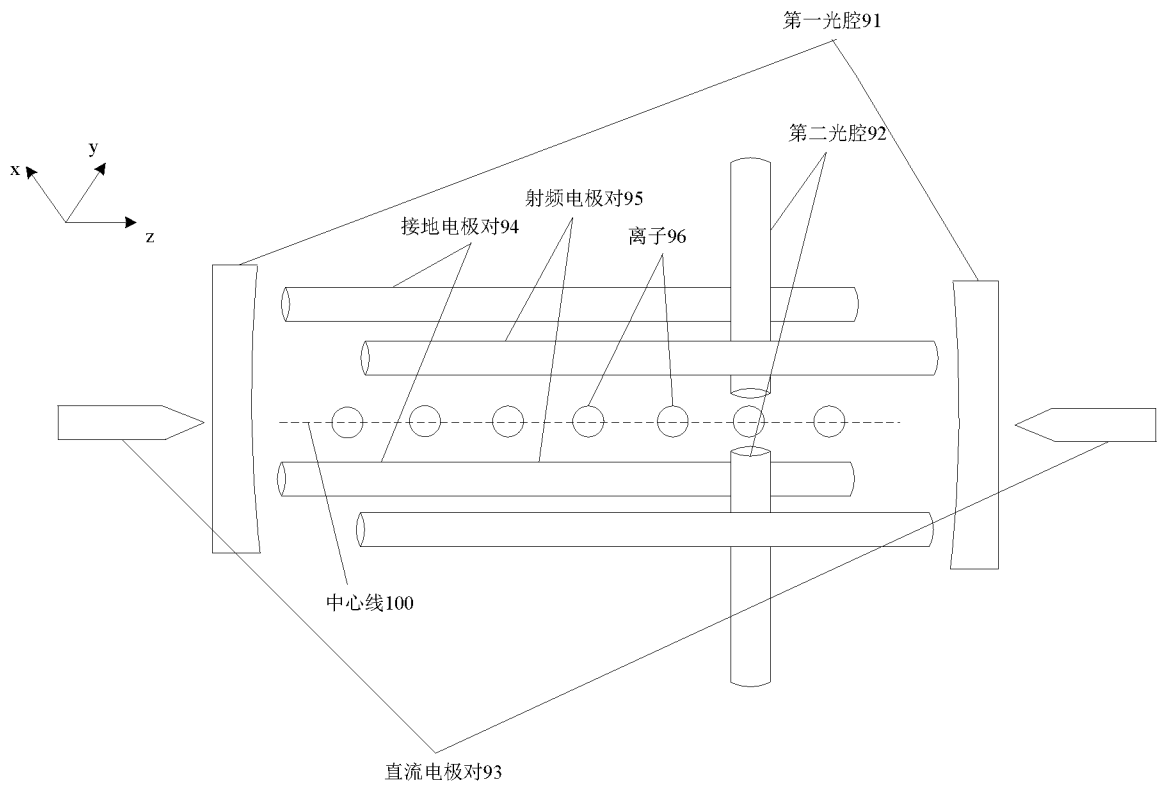


图 9

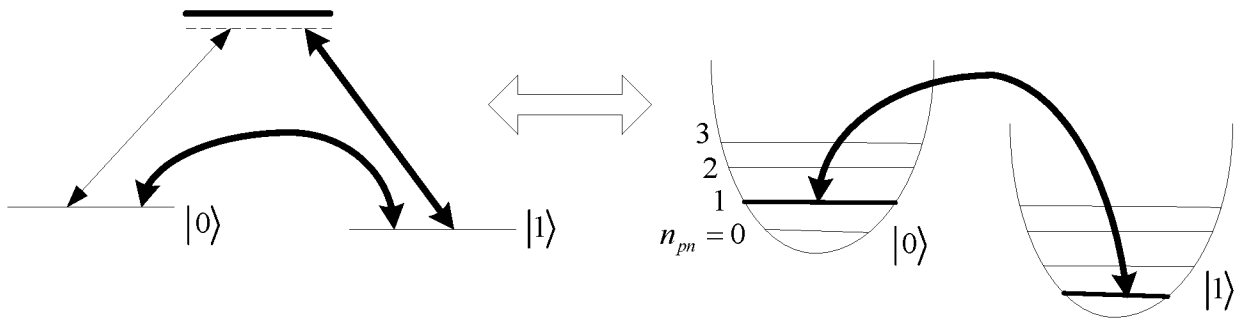


图 10

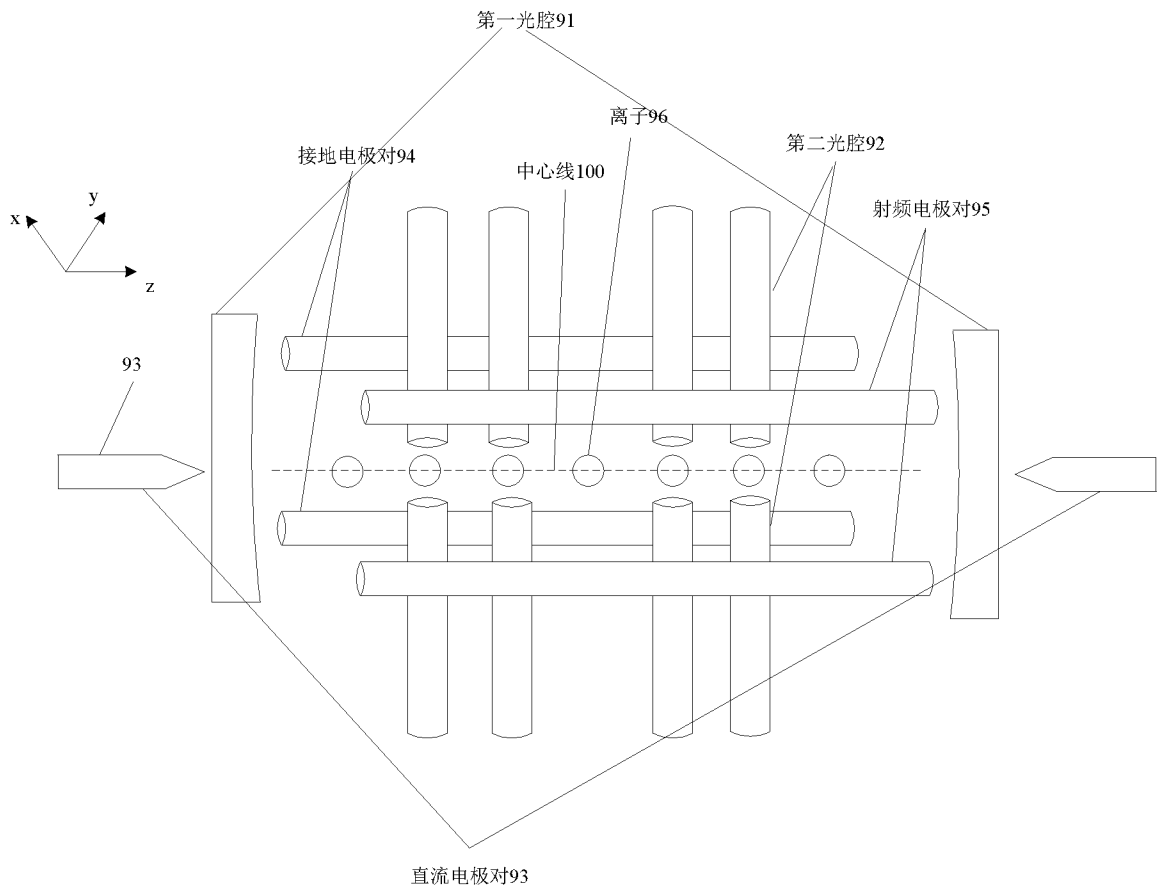


图 11

6/6

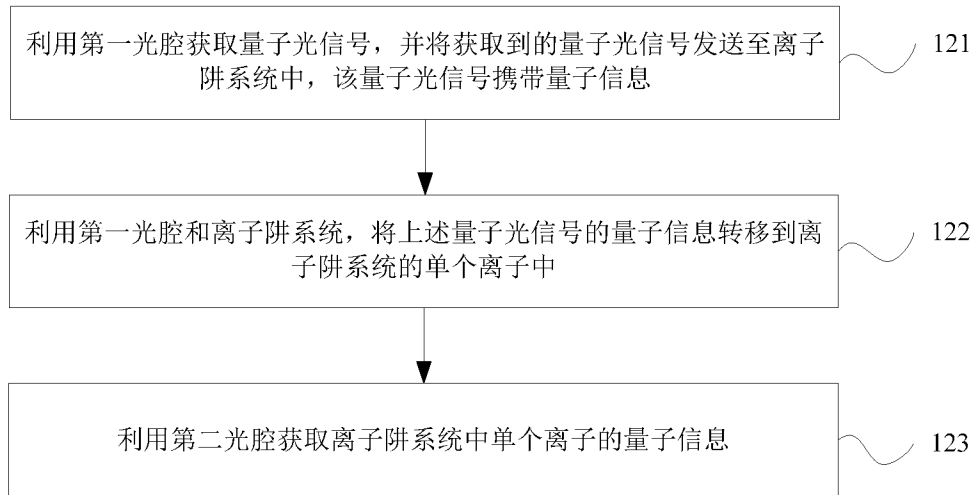


图 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/100253

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01J 49/42(2006.01)i; H04L 9/08(2006.01)i; G21K 1/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01J49/-; H04L9/-; G21K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 离子, 光腔, 镜面, 电极, 阱, 量子, mirror?, electrode?, optical w cavity, quantum, ion w trap

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GB 2527268 A (TANIA SCHEEL MONTEIRO ET AL.) 23 December 2015 (2015-12-23) description, page 1, line 44 to page 11, line 25, and figures 1 and 2	1-20
A	CN 103714878 A (WUHAN INSTITUTE OF PHYSICS AND MATHEMATICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 09 April 2014 (2014-04-09) entire document	1-20
A	CN 105308716 A (SK TELECOMMUNICATIONS CO., LTD. ET AL.) 03 February 2016 (2016-02-03) entire document	1-20
A	CN 105190827 A (THE UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA AT CHAPEL HILL) 23 December 2015 (2015-12-23) entire document	1-20
A	US 9858531 B1 (UNIVERSITY OF MARYLAND ET AL.) 02 January 2018 (2018-01-02) entire document	1-20
A	CN 205582886 U (THERMO FINNIGAN LLC) 14 September 2016 (2016-09-14) entire document	1-20

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 September 2019

Date of mailing of the international search report

09 October 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

**China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)**
**No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088**
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/100253

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
GB	2527268	A	23 December 2015	GB	201404103	D0	23 April 2014
CN	103714878	A	09 April 2014	CN	103714878	B	08 June 2016
CN	105308716	A	03 February 2016	US	9548179	B2	17 January 2017
				US	2016027604	A1	28 January 2016
				KR	101482440	B1	15 January 2015
				WO	2015056872	A1	23 April 2015
				CN	105308716	B	25 January 2017
CN	105190827	A	23 December 2015	US	9252005	B2	02 February 2016
				US	2016141168	A1	19 May 2016
				JP	2016517138	A	09 June 2016
				EP	2973650	A1	20 January 2016
				US	2014264001	A1	18 September 2014
				US	10141178	B2	27 November 2018
				US	8878127	B2	04 November 2014
				WO	2014143101	A1	18 September 2014
				CN	105190827	B	03 August 2018
				US	2017263432	A1	14 September 2017
				CN	109148255	A	04 January 2019
				US	2019096655	A1	28 March 2019
				US	2015122990	A1	07 May 2015
US	9858531	B1	02 January 2018	US	2018114138	A1	26 April 2018
CN	205582886	U	14 September 2016	US	9524855	B2	20 December 2016
				EP	3032568	B1	17 October 2018
				EP	3032568	A1	15 June 2016
				US	2016172173	A1	16 June 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/100253

<p>A. 主题的分类</p> <p>H01J 49/42(2006.01)i; H04L 9/08(2006.01)i; G21K 1/00(2006.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																							
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>H01J49/-; H04L9/-; G21K</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 离子, 光腔, 镜面, 电极, 阱, 量子, mirror?, electro?, optical w cavity, quantum, ion w trap</p>																							
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>GB 2527268 A (TANIA SCHEEL MONTEIRO 等) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第1页第44行-第11页第25行、附图1, 2</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103714878 A (中国科学院武汉物理与数学研究所) 2014年 4月 9日 (2014 - 04 - 09) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105308716 A (SK电信有限公司 等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105190827 A (北卡罗来纳-查佩尔山大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 9858531 B1 (UNIVERSITY OF MARYLAND 等) 2018年 1月 2日 (2018 - 01 - 02) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 205582886 U (萨默费尼根有限公司) 2016年 9月 14日 (2016 - 09 - 14) 全文</td> <td>1-20</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> <p>* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件</p>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	GB 2527268 A (TANIA SCHEEL MONTEIRO 等) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第1页第44行-第11页第25行、附图1, 2	1-20	A	CN 103714878 A (中国科学院武汉物理与数学研究所) 2014年 4月 9日 (2014 - 04 - 09) 全文	1-20	A	CN 105308716 A (SK电信有限公司 等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 全文	1-20	A	CN 105190827 A (北卡罗来纳-查佩尔山大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 全文	1-20	A	US 9858531 B1 (UNIVERSITY OF MARYLAND 等) 2018年 1月 2日 (2018 - 01 - 02) 全文	1-20	A	CN 205582886 U (萨默费尼根有限公司) 2016年 9月 14日 (2016 - 09 - 14) 全文	1-20
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
A	GB 2527268 A (TANIA SCHEEL MONTEIRO 等) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第1页第44行-第11页第25行、附图1, 2	1-20																					
A	CN 103714878 A (中国科学院武汉物理与数学研究所) 2014年 4月 9日 (2014 - 04 - 09) 全文	1-20																					
A	CN 105308716 A (SK电信有限公司 等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 全文	1-20																					
A	CN 105190827 A (北卡罗来纳-查佩尔山大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 全文	1-20																					
A	US 9858531 B1 (UNIVERSITY OF MARYLAND 等) 2018年 1月 2日 (2018 - 01 - 02) 全文	1-20																					
A	CN 205582886 U (萨默费尼根有限公司) 2016年 9月 14日 (2016 - 09 - 14) 全文	1-20																					
国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期																						
2019年 9月 9日	2019年 10月 9日																						
ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员																						
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	范伟																						
传真号 (86-10)62019451	电话号码 86-(10)-53962582																						

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/100253

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
GB	2527268	A	2015年 12月 23日	GB	201404103	D0	2014年 4月 23日
CN	103714878	A	2014年 4月 9日	CN	103714878	B	2016年 6月 8日
CN	105308716	A	2016年 2月 3日	US	9548179	B2	2017年 1月 17日
				US	2016027604	A1	2016年 1月 28日
				KR	101482440	B1	2015年 1月 15日
				WO	2015056872	A1	2015年 4月 23日
				CN	105308716	B	2017年 1月 25日
CN	105190827	A	2015年 12月 23日	US	9252005	B2	2016年 2月 2日
				US	2016141168	A1	2016年 5月 19日
				JP	2016517138	A	2016年 6月 9日
				EP	2973650	A1	2016年 1月 20日
				US	2014264001	A1	2014年 9月 18日
				US	10141178	B2	2018年 11月 27日
				US	8878127	B2	2014年 11月 4日
				WO	2014143101	A1	2014年 9月 18日
				CN	105190827	B	2018年 8月 3日
				US	2017263432	A1	2017年 9月 14日
				CN	109148255	A	2019年 1月 4日
				US	2019096655	A1	2019年 3月 28日
				US	2015122990	A1	2015年 5月 7日
US	9858531	B1	2018年 1月 2日	US	2018114138	A1	2018年 4月 26日
CN	205582886	U	2016年 9月 14日	US	9524855	B2	2016年 12月 20日
				EP	3032568	B1	2018年 10月 17日
				EP	3032568	A1	2016年 6月 15日
				US	2016172173	A1	2016年 6月 16日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)