



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114068292 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 18

(21) 申请号 202010754806.5

(22) 申请日 2020.07.30

(71) 申请人 华为技术有限公司

地址 518129 广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼

(72) 发明人 吕为民 李政宇 沈杨超

(74) 专利代理机构 北京同达信恒知识产权代理有限公司 11291

代理人 落爱青

(51) Int. Cl.

H01J 49/42 (2006.01)

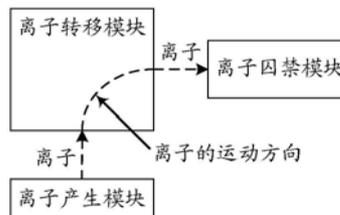
权利要求书2页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

一种离子阱系统及离子囚禁方法

(57) 摘要

一种离子阱系统及离子囚禁方法,离子阱系统用于解决现有技术中离子囚禁模块中较容易沉积多余的原子,造成离子阱系统中的电极被污染的问题。本申请中,离子阱系统可包括:离子产生模块用于产生离子,并将离子射向离子转移模块;离子转移模块用于改变接收到的离子的运动方向,将离子转移至离子囚禁模块;离子囚禁模块用于囚禁离子转移模块转移过来的离子。通过离子转移模块改变离子的运动方向后,实现转移至离子囚禁模块,从而有助于避免的离子产生模块直接向离子囚禁模块喷射离子,造成多余的离子沉积到离子囚禁模块。



1. 一种离子阱系统,其特征在于,包括:离子产生模块、离子转移模块和离子囚禁模块;  
所述离子产生模块,用于产生离子,并将所述离子射向所述离子转移模块;  
所述离子转移模块,用于改变接收到的所述离子的运动方向,将所述离子转移至所述离子囚禁模块;  
所述离子囚禁模块,用于囚禁所述离子转移模块转移过来的所述离子。
2. 如权利要求1所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块,具体用于:  
通过电场和/或磁场改变所述离子的运动方向。
3. 如权利要求2所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块,还用于:  
通过关闭所述电场和/或所述磁场,停止向所述离子囚禁模块转移所述离子。
4. 如权利要求2或3所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块,还用于:  
通过所述磁场,选择所述离子的同位素。
5. 如权利要求2至4任一项所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块包括亥姆霍兹线圈或永磁体;  
所述离子转移模块,具体用于:通过所述亥姆霍兹线圈或所述永磁体产生的磁场,改变接收到的所述离子的运动方向,并将所述离子离开所述离子转移模块时的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第一区域。
6. 如权利要求2或3所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块包括电极板或导电管;  
所述离子转移模块,具体用于:通过所述电极板或所述导电管产生的电场,改变接收到的所述离子的运动方向,并将所述离子离开所述离子转移模块时的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第二区域。
7. 如权利要求2或3所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子转移模块为第一离子阱;  
所述第一离子阱,用于囚禁接收到的所述离子;  
所述离子转移模块,具体用于:通过调整所述第一离子阱的电场大小,将所述离子离开所述离子转移模块时的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第三区域。
8. 如权利要求1至7任一项所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子产生模块包括激光产生模块和原子产生模块;  
所述原子产生模块,用于产生原子和/或离子;  
所述激光产生模块,用于向所述原子产生模块产生的原子发射第一激光,所述第一激光用于将所述原子电离为离子。
9. 如权利要求1至8任一项所述的离子阱系统,其特征在于,所述离子阱系统还包括降速模块,所述降速模块位于所述离子转移模块与所述离子产生模块之间;  
所述降速模块,用于对来自所述离子产生模块产生的所述离子进行降速,并将降速后的离子射向所述离子转移模块。
10. 一种离子囚禁方法,其特征在于,应用于离子阱系统,所述离子阱系统包括离子囚禁模块;所述方法包括:  
产生离子;  
改变所述离子的运动方向,以将所述离子转移至所述离子囚禁模块;  
通过所述离子囚禁模块对转移过来的所述离子进行囚禁。

11. 如权利要求10所述的方法,其特征在于,所述改变所述离子的运动方向,包括:  
通过电场和/或磁场,改变所述离子的运动方向。
12. 如权利要求11所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:  
通过关闭所述电场和/或所述磁场,停止向所述离子囚禁模块转移所述离子。
13. 如权利要求11或12所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:  
通过所述磁场,选择所述离子的同位素。
14. 如权利要求11至13任一项所述的方法,其特征在于,所述改变所述离子的运动方向,包括:  
通过亥姆霍兹线圈或永磁体产生的磁场,将所述离子离开所述磁场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第一区域。
15. 如权利要求10或11所述的方法,其特征在于,所述改变所述离子的运动方向,包括:  
通过所述电极板或所述导电管产生的电场,将所述离子离开所述电场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第二区域。
16. 如权利要求10或11所述的方法,其特征在于,所述改变所述离子的运动方向,包括:  
通过调整第一离子阱的电场大小,将所述离子离开所述第一离子阱时的运动的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第三区域。
17. 如权利要求10至16任一项所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:  
对所述离子进行降速。

## 一种离子阱系统及离子囚禁方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及量子计算技术领域,尤其涉及一种离子阱系统及离子囚禁方法。

### 背景技术

[0002] 随着信息技术的发展,量子计算越来越受关注。量子计算的特殊之处在于,量子态的叠加特性使得大规模“并行”计算成为可能。这是因为量子计算的基本原理是利用量子比特(即离子)对信息进行编码,其中,单个量子比特的状态不仅有0和1两种经典态,还可以有0和1的叠加态, $n$ 个量子比特可以同时处于 $2^n$ 个量子态的叠加状态。各量子算法就是在不同数量的量子比特上进行不同的量子操作,量子比特数目越多,其并行加速能力就越强,对于相同问题其求解的速率就越快。

[0003] 量子比特的构建有多种物理体系可实现。例如,离子阱系统、超导电路、氮空穴色心(nitrogen-vacancy center,NV)、半导体量子点、拓扑量子计算等。其中,离子阱因其具有相对长的比特相干时间、较好的保真度和潜在的可扩展性等优点,具有非常大的发展潜力。离子阱系统是利用离子内部能级作为天然的量子比特(qubit),有着与环境相互作用小,相干时间长,操作和读出保真度高的优势,是未来可扩展量子计算较为有前途的系统之一。离子阱系统的形成,大体上可以分为:加载(load)离子、激光冷却、态操作、态读出,其中,加载离子是离子阱系统形成的重要过程。

[0004] 目前,加载离子常用的方法包括电阻加热(resistively heating)和激光烧蚀(laser ablation)。其中,电阻加热加载离子的过程主要包括:用大电流通过装有所需要的金属元素单质或者化合物的原子炉(oven),经过5-10分钟左右持续加热,温度被加热到几百摄氏度(比如对于Ca,650K)以上,原子从原子炉的狭小口径中喷射至离子阱势场的中心区域,大量的原子形成原子束,原子束喷射至离子阱势场的中心区域。原子束运动到离子阱势场中心区域时,被聚焦在该区域的离子化光(通常包含两个波长)光致电离形成离子,因而会受到势场的作用被囚禁,再经过激光冷却的操作之后,离子能够在该离子阱中稳定囚禁。电阻加热加载离子的操作相对简单,但是由于需要长时间持续加热,因此,原子炉区域温度较高,高温的原子束喷射至离子阱势场的中心区域时,可能会引入比较大的热载,进而影响离子阱系统的制冷效果。激光烧蚀加载离子的过程主要包括:用高强度的激光聚焦在金属表面,随着激光能量的沉积,金属表面局部区域温度升高,甚至熔化汽化,大量的金属粒子(包括离子和原子等)从金属表面逸出形成粒子束流。激光烧蚀加载离子时,需要原子炉出口方向指向离子阱中心区域,因此,需要脉冲烧蚀光穿过离子阱中心区域以指向原子炉出口方向。这样,脉冲烧蚀光可能会对离子阱的电极表面也产生烧蚀,从而影响电极表面结构。

### 发明内容

[0005] 本申请提供一种离子阱系统及离子囚禁方法,用于尽可能避免多余的原子沉积在离子囚禁模块。

[0006] 第一方面,本申请提供一种离子阱系统,该离子阱系统可包括离子产生模块、离子转移模块和离子囚禁模块;离子产生模块用于产生离子,并将离子射向离子转移模块;离子转移模块用于改变接收到的离子的运动方向,将离子转移至离子囚禁模块;离子囚禁模块用于囚禁所述离子转移模块转移过来的所述离子。

[0007] 基于该方案,该离子阱系统可通过离子转移模块将离子产生模块和离子囚禁模块在空间上分开,即离子产生模块不会直接向离子囚禁模块喷射原子,而是通过离子转移模块将来自离子产生模块的产生的离子的运动方向改变后,以实现转移至离子囚禁模块,从而有助于避免的多余的离子沉积到离子囚禁模块。

[0008] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块具体用于通过电场和/或磁场改变离子的运动方向。

[0009] 通过电场和/或磁场,可以精确控制离子的运动方向,从而可精确控制离子进入离子囚禁模块的方向。

[0010] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块还用于通过关闭电场和/或磁场,停止向离子囚禁模块转移离子。

[0011] 通过控制电场和/或磁场的关闭,进而可停止离子转移模块向离子囚禁模块转移离子。也可以理解为,当离子囚禁模块囚禁的离子的数量满足需求时,可立即关闭电场,从而不会再有离子进入离子囚禁模块,即可有效控制进入离子囚禁模块的离子数量,从而可有助于进一步避免多余的离子沉积于囚禁模块。

[0012] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块还用于通过磁场选择离子的同位素。也就是说,如果离子转移模块是通过磁场改变接收到的离子的运动方向,该磁场还可用于选择离子的同位素。

[0013] 通过选择离子的同位素,可以减小离子阱系统对元素纯度的要求,进而有助于降低选择材料的成本。

[0014] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块包括亥姆霍兹线圈或永磁体;离子转移模块具体用于通过亥姆霍兹线圈或永磁体产生的磁场,改变接收到的离子的运动方向,并将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第一区域。

[0015] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块包括电极板或导电管;离子转移模块具体用于通过电极板或导电管产生的电场,改变接收到的离子的运动方向,将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第二区域。

[0016] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块为第一离子阱;第一离子阱用于囚禁接收到的离子;离子转移模块具体用于通过调整第一离子阱的电场大小,将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第三区域。

[0017] 在一种可能的实现方式中,离子产生模块包括激光产生模块和原子产生模块;原子产生模块用于产生原子和/或离子;激光产生模块用于向原子产生模块产生的原子发射第一激光,所述第一激光用于将原子电离为离子。

[0018] 在一种可能的实现方式中,离子阱系统还包括降速模块,降速模块位于离子转移模块与离子产生模块之间;降速模块用于对来自离子产生模块产生的离子进行降速,并将降速后的离子射向离子转移模块。

[0019] 通过降速模块,可有效降低来自离子产生模块的离子的速度,从而有助于提高离

子转移模块转移离子的效率。

[0020] 第二方面,本申请提供一种离子囚禁方法,可应用于离子阱系统,所述离子阱系统包括离子囚禁模块;方法包括:产生离子;改变所述离子的运动方向,以将所述离子转移至所述离子囚禁模块;通过所述离子囚禁模块对转移过来的所述离子进行囚禁。

[0021] 在一种可能的实现方式中,可通过电场和/或磁场,改变离子的运动方向。

[0022] 在一种可能的实现方式中,还可通过关闭电场和/或磁场,停止向离子囚禁模块转移离子。

[0023] 进一步,可选地,通过所述磁场,选择所述离子的同位素。

[0024] 在一种可能的实现方式中,通过亥姆霍兹线圈或永磁体产生的磁场,将所述离子离开所述磁场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第一区域。

[0025] 在一种可能的实现方式中,通过所述电极板或所述导电管产生的电场,将所述离子离开所述电场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第二区域。

[0026] 在一种可能的实现方式中,通过调整第一离子阱的电场大小,将所述离子离开所述第一离子阱时的运动的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第三区域。

[0027] 在一种可能的实现方式中,可对离子进行降速。

[0028] 上述第二方面或第二方面中任一项可以达到的技术效果可以参照上述第一方面中有益效果的描述,此处不再重复赘述。

## 附图说明

[0029] 图1为本申请提供了一种离子阱系统的结构示意图;

[0030] 图2a为本申请提供了一种原子产生模块的工作原理示意图;

[0031] 图2b为本申请提供的另一种原子产生模块的工作原理示意图;

[0032] 图3为本申请提供的离子囚禁模块为芯片阱的结构示意图;

[0033] 图4为本申请提供了一种离子阱的结构示意图;

[0034] 图5为本申请提供的另一种离子阱的结构示意图;

[0035] 图6为本申请提供的又一种离子阱的结构示意图;

[0036] 图7为本申请提供的又一种离子阱的结构示意图;

[0037] 图8为本申请提供的又一种离子阱的结构示意图;

[0038] 图9为本申请提供了一种离子囚禁方法的方法流程示意图。

## 具体实施方式

[0039] 下面将结合附图,对本申请实施例进行详细描述。

[0040] 以下,对本申请中的部分用语进行解释说明。需要说明的是,这些解释是为了便于本领域技术人员理解,并不是对本申请所要求的保护范围构成限定。

[0041] 1) 彭宁(Penning)离子阱

[0042] 彭宁离子阱(或称为Penning阱)是一个可以储存带电粒子的装置,通常使用均匀轴向磁场和不均匀四极电场束缚离子。具体地,使用轴向的强匀磁场来限制带电粒子的径向轨迹,用四极电场来限制带电粒子的轴向轨迹。使用三个一组的电极产生的静电势:一个环形电极和两个末端电极。在一个理想的彭宁离子阱中,环和末端旋转拉伸出来的双曲面。

在捕获正(负)离子的情况下,末端电极相对于环被维持在正(负)电位。这种电势在产生势阱产生了一个“鞍点”,因此将离子限制在轴向的中心。电场使得离子在轴向中心运动的时候不断振荡(理想状态下振荡成简谐运动)。配合电场使用的磁场使得带电粒子在径向平面的运动中画出一个外旋轮线。

[0043] 2) Paul 离子阱

[0044] Paul 离子阱(或称为Paul阱)通常是指使用四极电场构成的势阱,可把带电粒子存储在阱内的特定区域的装置。Paul 离子阱的内表面是由两个绕Z轴旋转的双曲面电极(称为帽电极或端电极)和一个以XY平面为对称切面的双曲环形电极(称为环电极)组成,可参见下述图7所示的第一离子阱。

[0045] 如背景技术,目前的离子阱系统中,加载离子常用的方法包括电阻加热和激光烧蚀。电阻加热和激光烧蚀都需要原子炉的出口方向指向囚禁离子的区域,使得从原子炉喷射出的原子束流直接喷射向离子囚禁区域,由于从原子炉中喷出的原子数目较大,很容易沉积在离子囚禁区域包括的电极的表面,会改变电极表面的结构引入杂散电场,从而降低对离子操控的保真度。另外,对于电阻加热的方式,由于需要长时间持续加热,原子炉区域温度较高,可能会对低温离子阱系统引入比较大的热量。对于激光烧蚀的方式,需要原子炉出口方向指向离子阱的中心区域,因此,需要烧蚀激光穿过离子阱中的电极的中心区域以指向原子炉出口方向。由于烧蚀激光的瞬时能量较高,可能会对离子阱的电极表面也产生烧蚀,从而影响电极表面结构。

[0046] 鉴于上述问题,本申请提出一种离子阱系统。该离子阱系统可通过离子转移模块将离子产生模块和离子囚禁模块在空间上分开,即离子产生模块产生的离子不会直接喷向离子囚禁模块,而是通过离子转移模块改变离子的运动方向后,以转移至离子囚禁模块,从而有助于避免多余的离子沉积到离子囚禁模块。

[0047] 下面结合附图1至附图8,对本申请提出的离子阱系统进行具体阐述。

[0048] 基于上述内容,如图1所示,为本申请提供的一种离子阱系统的结构示意图。该离子阱系统可包括离子产生模块、离子转移模块和离子囚禁模块。离子产生模块可用于产生离子,并将离子射向离子转移模块。离子转移模块用于改变接收到的离子的运动方向,以将离子转移至离子囚禁模块;示例性地,将离子离开离子转移模块的运动方向指向离子囚禁模块。离子囚禁模块用于囚禁所述离子转移模块转移过来的所述离子。

[0049] 基于该离子阱系统,可通过离子转移模块将离子产生模块和离子囚禁模块在空间上分开,即离子产生模块不会直接向离子囚禁模块喷射原子,而是通过离子转移模块将来自离子产生模块的产生的离子的运动方向改变后,以实现转移至离子囚禁模块,从而有助于避免的多余的离子沉积到离子囚禁模块。

[0050] 下面对图1所示的各个功能组件和结构分别进行介绍说明,以给出示例性的具体实现方案。

[0051] 一、离子产生模块

[0052] 离子产生模块可称为离子源,离子产生模块可以产生离子,大量的离子可形成离子束流。

[0053] 在一种可能的实现方式中,离子产生模块可包括原子产生模块和激光产生模块,原子产生模块可经过电阻加热或激光烧蚀,产生原子和/或离子(可统称为粒子),激光产生

模块用于向原子产生模块产生的原子发射第一激光,第一激光用于将原子电离为离子。通常,激光产生模块用于产生两束第一激光,原子从其中一束第一激光中吸收一个光子的能量,跃迁到一个激发态后,再从另一束第一激光中吸收一个光子的能量使原子失去最外层的电子,形成离子。需要说明的是,两束第一激光的波长可以相等,也可以不相等,本申请对此不做限定。例如,激光产生模块可以产生两束第一激光,其中一束第一激光的波长为399nm,另一束第一激光的波长为369nm,通过399nm的第一激光可将原子的最外层的电子从基态激发到激发态,再通过369nm的第一激光,将原子中处于激发态的最外层电子电离,形成离子。

[0054] 如图2a所示,为本申请提供的一种原子产生模块的工作原理意图。该原子产生模块是通过电阻加热方式产生粒子。原子产生模块可包括装有金属材料的原子炉,电流通过装有金属材料的原子炉,对原子炉中的金属材料加热至一定温度(如几百度)后,会有大量的原产从原子炉中喷出。应理解,电阻加热产生的是原子。

[0055] 如图2b所示,为本申请提供的另一种原子产生模块的工作原理示意图。该原子产生模块是通过激光烧蚀方式产生原子和/或离子的。该原子产生模块可包括装有金属材料的原子炉,烧蚀激光聚焦到原子炉中的金属材料的表面,随着烧蚀激光的强度的增加,金属表面的温度在升高,甚至熔化汽化,大量的金属粒子(包括原子和离子)从金属表面逸出形成粒子束流。通过调整烧蚀激光的强度,可改变产生的粒子束流中原子与离子的占比。当烧蚀激光的强度较弱时,粒子束流中的原子占大多数;随着烧蚀激光的强度的增加,粒子束流中的离子占大多数。

[0056] 需要说明的是,烧蚀激光可以是脉冲激光,也可以是连续激光。另外,通常烧蚀激光与第一激光来自不同的激光器。这是因为烧蚀激光需要的瞬时能量比较高,第一激光需要频率比较稳定。烧蚀激光的波长可与第一激光的波长相等,也可以不相等,本申请对此不做限定。

[0057] 应理解,若原子产生模块产生的粒子中包括原子,则需要对原子进行进一步的电离,以得到离子;若原子产生模块产生的粒子为离子,则可直接射入离子转移模块。示例性地,若原子产生模块为原子炉,可将第一激光射向原子炉的口径,以将原子电离为离子。

[0058] 在一种可能的实现方式中,用于产生粒子的金属材料,例如可为镱(Yb)、钙(Ca)或铍(Be)等适用于量子计算的元素。

[0059] 需要说明的是,上述离子产生模块包括但不限于装于原子炉中的金属材料,也可以是金属块或金属丝等,本申请对此不做限定。

## [0060] 二、离子囚禁模块

[0061] 在一种可能的实现方式中,离子囚禁模块可用于囚禁离子转移模块转移过来的离子。本申请中,离子阱囚禁模块可以是四极阱(four-rod trap)、或者刀片阱(blade trap)、或者是芯片阱(surface trap)等,本申请对此不做限定。

[0062] 如图3所示,为本申请提供的一种离子囚禁模块为芯片阱的结构示意图。该离子囚禁模块可包括基底和设置于基底上的直流电源(direct current,DC)电极和射频(radio frequency,RF)电极。离子可在DC电极和RF电极的形成的电场的作用下,被囚禁在离子囚禁区域。离子囚禁区域囚禁的离子可以是一维排布(即一维离子链),也可以是二维的平面排布。在二维平面排布中,离子有更丰富的转移自由度以及更稳固的结构。

[0063] 需要说明的是,一维离子排布或二维离子排布上的相邻两个离子之间的间隔可以相等,也可以不相等。离子囚禁模块中囚禁的离子的具体排布方式与数量与所要执行的量子算法相关。另外,在离子囚禁模块中囚禁的离子需要与外界环境隔离,防止其他粒子对囚禁的离子的碰撞,造成囚禁的离子丢失,因此,离子囚禁模块通常处于真空系统,其中,真空系统也可以是超高真空系统。

[0064] 进一步,可选地,将离子囚禁于离子囚禁模块的囚禁区域后,可对离子阱系统中的离子进行量子操控以完成量子任务,例如量子计算、量子模拟和量子精密测量等。

[0065] 三、离子转移模块

[0066] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块可通过电场、或磁场、或电场和电场、或磁场和电场,来改变离子的运动方向,以使离子转移至离子囚禁模块。也就是说,可通过电场、磁场、电场和电场、磁场和电场中的任一种,来改变进入的离子转移模块的离子的运动方向,以实现将来自离子产生模块产生的离子转移至离子囚禁模块。例如,可使得进入离子转移模块的离子的运动方向发生一定角度的偏转,以将离子转移至离子囚禁模块。

[0067] 如下,分别基于不同的情形,对离子转移模块进行介绍说明。

[0068] 情形1、离子转移模块通过磁场改变离子的运动方向。

[0069] 在一种可能的实现方式中,可通过磁场改变接收到的离子的运动方向,将离子离开离子转移模块(即磁场)时的方向调整为指向离子囚禁模块的第一区域,请参阅图4。离子进入磁场后,在磁场中受到洛仑磁力的作用,会发生偏转,从而改变了离子的运动方向,进一步,可调整使得离子离开磁场时的方向指向离子囚禁模块的第一区域。其中,第一区域可以是离子囚禁模块的中心区域,中心区域通常用于囚禁离子;也可以是与离子囚禁模块的中心区域距离一定距离的任意区域,本申请对此不做限定。

[0070] 结合上述图4,由于离子产生模块产生的离子的方向和速度在一个范围内,因此,可通过调整磁场的大小,使得离子离开磁场时的出射方向指向离子囚禁模块的第一区域。即离子转移模块可选择出速度合适的离子进入离子囚禁模块。示例性地,若磁场为均匀磁场,可根据公式1,选择出速度合适的离子进入离子囚禁模块。

[0071] 
$$R = \frac{mv}{Bq}$$
 公式 1

[0072] 若离子离开离子转移模块时的方向与离子囚禁模块的第一区域的中心线之间的夹角为0度,可以正好射入离子囚禁模块的第一区域;当离子离开离子转移模块时的方向与离子囚禁模块的第一区域的中心线之间的夹角为大于0度的 $\alpha$ ,说明离子的偏转角度较小,可增大磁场强度,使得离子的转弯半径减小(即偏转角增大),从而使得离子离开离子转移模块时的方向与离子囚禁模块的第一区域的中心线之间的夹角为尽可能等于0度。当离子离开离子转移模块时的方向与离子囚禁模块的第一区域的中心线之间的夹角为小于0度的 $\beta$ ,说明离子的偏转角度较大,可减小磁场强度,使得离子的转弯半径增加(即偏转角减小),从而使得离子离开离子转移模块时的方向与离子囚禁模块的第一区域的中心线之间的夹角为尽可能等于0度。

[0073] 进一步,可选地,由于离子的不同同位素的荷质比 $\frac{q}{m}$ 不同,同一金属材料的不同同位素从磁场出射的方向也不同,因此,若离子转移模块为磁场时,磁场还可以用于选择离子的同位素,从而可以减小离子阱系统对元素纯度的要求。

[0074] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块包括亥姆霍兹线圈(Helmholtz coil)或永磁体或其它可产生磁场的磁性元件。应理解,可通过改变输入亥姆霍兹线圈或永磁体的电流大小来改变亥姆霍兹线圈或永磁体产生的磁场。

[0075] 需要说明的是,上述磁场可以是均匀磁场(即匀强磁场),也可以是随时间变化的磁场(即交变磁场)。

[0076] 基于该情形1,可通过控制磁场的开启或关闭,进而可控制离子转移模块是否将离子转移至离子囚禁模块。当离子囚禁模块囚禁的离子的数量满足需求,可立即关闭磁场,从而不会再有离子进入离子囚禁模块,可有效控制进入离子囚禁模块的离子数量,从而可有助于避免多余的离子沉积于离子囚禁模块。

[0077] 情形2、离子转移模块通过电场改变粒子的运动方向。

[0078] 在一种可能的实现方式中,可通过电场改变接收到的离子的运动方向,将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第二区域,请参阅图5。离子进入电场后,在电场中的受到电场力的作用,会发生偏转,从而改变离子的运动方向,使得离子射入离子囚禁模块的第二区域。

[0079] 需要说明的是,第二区域可以是离子囚禁模块的中心区域,中心区域通常用于囚禁离子;也可以是与离子囚禁模块的中心区域距离一定距离的任意区域,本申请对此不做限定。另外,第二区域可以与第一区域相同,也可以与第一区域不同。

[0080] 结合上述图5,由于离子产生模块产生的离子的方向和速度在一个范围内,可通过调整离子转移模块的电场大小(以离子在均匀电场为例),使得离子离开离子转移模块时的方向指向离子囚禁模块的第二区域。

[0081] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块可包括电极板或导电管或其它可产生电场的装置。进一步,可选地,向电极板或导电管通电,可使得电极板或导电管产生电场。

[0082] 需要说明的是,上述电场可以是均匀电场,也可以是随时间变化的电场(即交变电场)。应理解,对于随时间变化的电场。

[0083] 基于该情形2,可通过控制电场的开启或关闭,进而可控制离子转移模块是否将离子转移至离子囚禁模块。当离子囚禁模块囚禁的离子的数量满足需求,可立即关闭电场,从而不会再有离子进入离子囚禁模块,可有效控制进入离子囚禁模块的离子数量,从而可有助于避免多余的离子沉积于离子囚禁模块。

[0084] 情形3、离子转移模块通过磁场和电场改变离子的运动方向。

[0085] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块可以由磁场和电场形成的一个小型离子阱,称为第一离子阱,其中,第一离子阱可为Penning离子阱(可参见上述彭宁离子阱的相关介绍,此处不再重复赘述)。如图6所示,为本申请提供的一种离子阱的结构示意图。其中,第一离子阱用于囚禁来自离子产生模块的离子,并通过调整第一离子阱的电场大小,将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第三区域。也就是说,在第一离子阱将离子囚禁后,可改变形成第一离子阱的电场的大小,以使得电场推动离子向离子囚禁模块移动,且方向是指向离子囚禁模块的第三区域的。

[0086] 基于该情形3,可通过控制电场和/或磁场的开启或关闭,从而可精确控制离子转移模块转移的离子的数量,从而可有助于避免多余的离子沉积于离子囚禁模块。

[0087] 情形4、离子转移模块通过电场和电场改变离子的运动方向。

[0088] 在一种可能的实现方式中,离子转移模块也可以是电场和电场形成的一个小型离子阱,也可称为第一离子阱,该第一离子阱为Paul阱(可参见上述Paul离子阱的相关介绍,此处不再重复赘述)。如图7所示,为本申请提供的又一种离子阱的结构示意图。其中,第一离子阱用于囚禁来自离子产生模块的离子,并通过调整第一离子阱的电场大小,将离子离开离子转移模块时的方向调整为指向离子囚禁模块的第三区域。示例性地,在第一离子阱将离子囚禁后,可改变形成第一离子阱的环极所产生的电场的大小,以使得电场推动离子向离子囚禁模块转移,且方向是指向离子囚禁模块的第三区域的。

[0089] 需要说明的是,上述情形3和情形4中的第三区域可以是离子囚禁模块的中心区域,中心区域通常用于囚禁离子;也可以是与离子囚禁模块的中心区域距离一定距离的任意区域,本申请对此不做限定。另外,第三区域、第二区域、第一区域可以均相同,也可以均不同,或者其中任两个相同,本申请对此不做限定。

#### [0090] 四、降速模块

[0091] 从离子产生模块喷出的离子温度比较高(如几百K),平均速度约数百m/s,为了提高离子转移模块转移离子的效率,可先将离子产生模块产生的离子进行降速后,再发射至离子转移模块。也就是说,来自离子产生模块的离子先经降速模块进行降速后(例如降为数十m/s),再射向离子转移模块中。

[0092] 在一种可能的实现方式中,降速模块可通过对来自离子产生模块的离子进行蒸发冷却,以实现对该离子的降速。通常离子的温度可由10 $\mu$ K量级降低至1 $\mu$ K量级,如此,可使得离子的相空间密度也可增加两至三个数量级。甚至可将离子的温度降低至离子发生相变的能级,得到玻色-爱因斯坦凝聚体(nK温度量级),从而有助于提高离子转移模块转移离子的效率。

[0093] 进一步,可选地,降速模块可为纯磁阱或纯光阱。示例性地,若降速模块为纯磁阱,来自离子产生模块的离子经纯磁阱进行蒸发冷却,以实现对该离子的降温。其中,纯磁阱可指关闭磁光阱的冷却激光后,迅速提高亥姆霍兹线圈的磁场梯度,形成只需要磁场就能囚禁离子的结构。应理解,蒸发冷却的过程是不断剔除离子中温相对高的离子,剩下的离子通过弹性碰撞,达到热平衡,再产生温度相对高的离子,再剔除,如此重复该过程,实现对离子中离子进行冷却的效果。其中,磁光阱的工作原理是在由一对载有反向电流的亥姆霍兹线圈产生的梯度磁阱中,加上频率接近原子能级差的三对冷却激光(即一共6个冷却激光),每两个一对,每一对的入射方向相对,三对冷却激光从三个正交方向(例如XYZ三个方向)对射,交叉点位于磁阱中心。

[0094] 纯光阱是指一种由远红外激光形成的光阱囚禁离子的结构,囚禁原理为该远红外激光的频率与离子能级差数百个太赫兹量级,即该远红外激光的频率远小于离子能级差。当远红外激光照射到离子后,离子受到远红外激光的偶极力的作用,被吸引向光强最强的中心位置,实现将离子团装载于远红外激光中,通过持续降低远红外激光的光强,达到使离子降温的目的。

[0095] 需要说明的是,在进行量子操控过程中,若囚禁于离子囚禁模块的离子丢失,则可重新开启电场和/或磁场,重新通过上述任一实施例中的离子阱系统囚禁离子。

[0096] 基于上述内容,下面结合具体的硬件结构,给出上述离子阱系统的一种具体实现方式。以便于进一步理解上述离子阱系统的结构。

[0097] 如图8所示,为本申请提供的又一种离子阱系统的结构示意图。该离子阱系统可包括离子产生模块、降速模块、离子转移模块和离子囚禁模块,其中,离子产生模块包括原子炉和激光器。关于离子产生模块、降速模块、离子转移模块和离子囚禁模块的详细介绍,可参见前述相关描述,此处不再重复赘述。

[0098] 基于上述内容和相同的构思,图9示例性示出了本申请实施例提供的一种离子囚禁方法的方法流程示意图。该方法可应用于上述任一实施例中的离子阱系统,其中,离子阱系统可包括离子囚禁模块。该方法包括以下步骤:

[0099] 步骤901,产生离子。

[0100] 该步骤901可由上述离子阱系统中离子产生模块执行,具体可参见上述离子产生模块中的详细的介绍,此处不再赘述。

[0101] 步骤902,改变离子的运动方向,以将离子转移至离子囚禁模块。

[0102] 如下,示例性地示出三种改变离子的运动方向的可能的实现方式。

[0103] 实现方式1,通过亥姆霍兹线圈或永磁体产生的磁场,将所述离子离开所述磁场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第一区域。

[0104] 实现方式2,通过电极板或导电管产生的电场,将所述离子离开所述电场时的运动方向调整为指向所述离子囚禁模块的第二区域。

[0105] 实现方式3,通过调整第一离子阱的电场大小,将所述离子离开所述第一离子阱时的运动的方向调整为指向所述离子囚禁模块的第三区域。

[0106] 该步骤902可由上述离子阱系统中离子转移模块执行,具体可参见上述离子转移模块中的详细的介绍,此处不再赘述。

[0107] 步骤903,通过离子囚禁模块对转移过来的离子进行囚禁。

[0108] 该步骤903可由上述离子阱系统中离子囚禁模块执行,具体可参见上述离子囚禁模块中的详细的介绍,此处不再赘述。

[0109] 从上述步骤901至步骤903可以看出,通过改变离子的运动方向,可以使得离子不直接喷射至离子囚禁模块,从而有助于避免的多余的离子沉积到离子囚禁模块。

[0110] 在本申请的各个实施例中,如果没有特殊说明以及逻辑冲突,不同的实施例之间的术语和/或描述具有一致性、且可以相互引用,不同的实施例中的技术特征根据其内在的逻辑关系可以组合形成新的实施例。

[0111] 本申请中,“0度、90度”等不是指绝对的值,均可以允许有一定工程上的误差。“和/或”,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的情况,其中A,B可以是单数或者复数。在本申请的文字描述中,字符“/”,一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。另外,在本申请中,“示例性的”一词用于表示作例子、例证或说明。本申请中被描述为“示例”的任何实施例或设计方案不应被解释为比其它实施例或设计方案更优选或更具优势。或者可理解为,使用示例的一词旨在以具体方式呈现概念,并不对本申请构成限定。

[0112] 可以理解的是,在本申请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。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。术语“第一”、“第二”等类似表述,是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。此外,术语“包括”和“具有”以及

他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元。方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0113] 尽管结合具体特征及其实施例对本申请进行了描述,显而易见的,在不脱离本申请的精神和范围的情况下,可对其进行各种修改和组合。相应地,本说明书和附图仅仅是所附权利要求所界定的方案进行示例性说明,且视为已覆盖本申请范围内的任意和所有修改、变化、组合或等同物。

[0114] 显然,本领域的技术人员可以对本申请进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本申请实施例的这些修改和变型属于本申请权利要求及其等同技术的范围之内,则本申请也意图包含这些改动和变型在内。

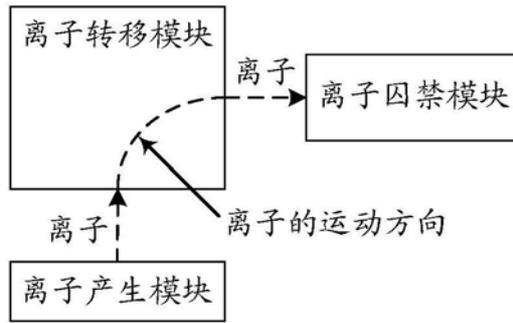


图1

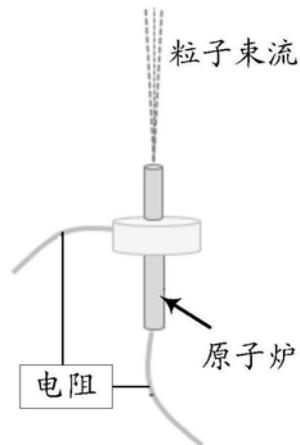


图2a

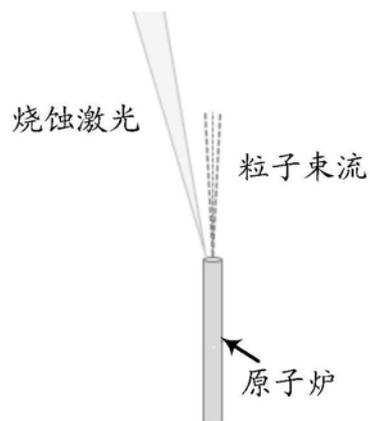


图2b

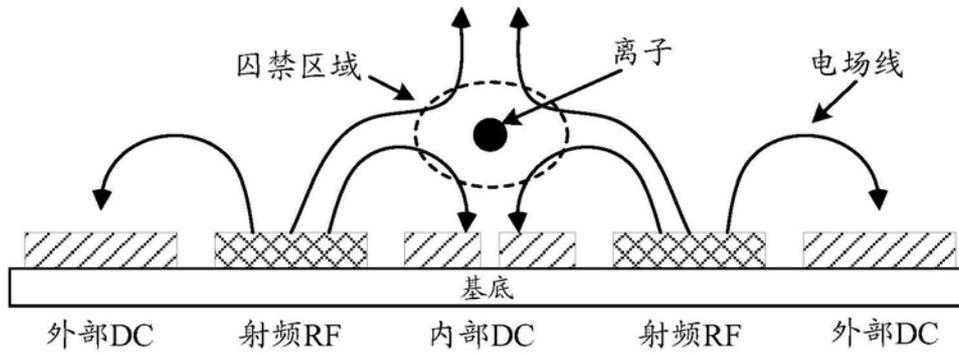


图3

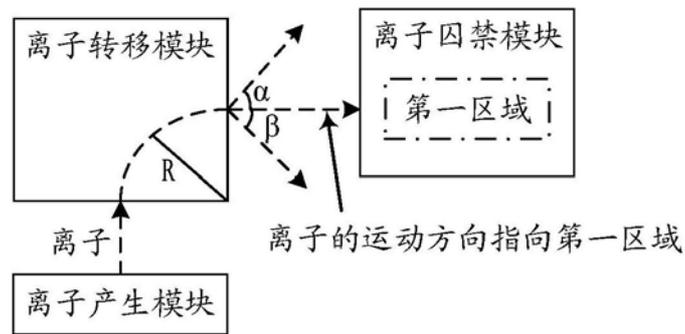


图4

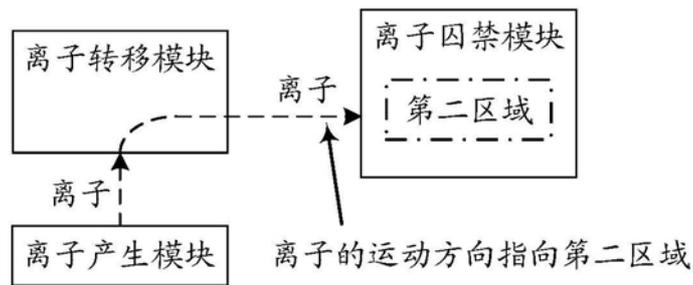


图5

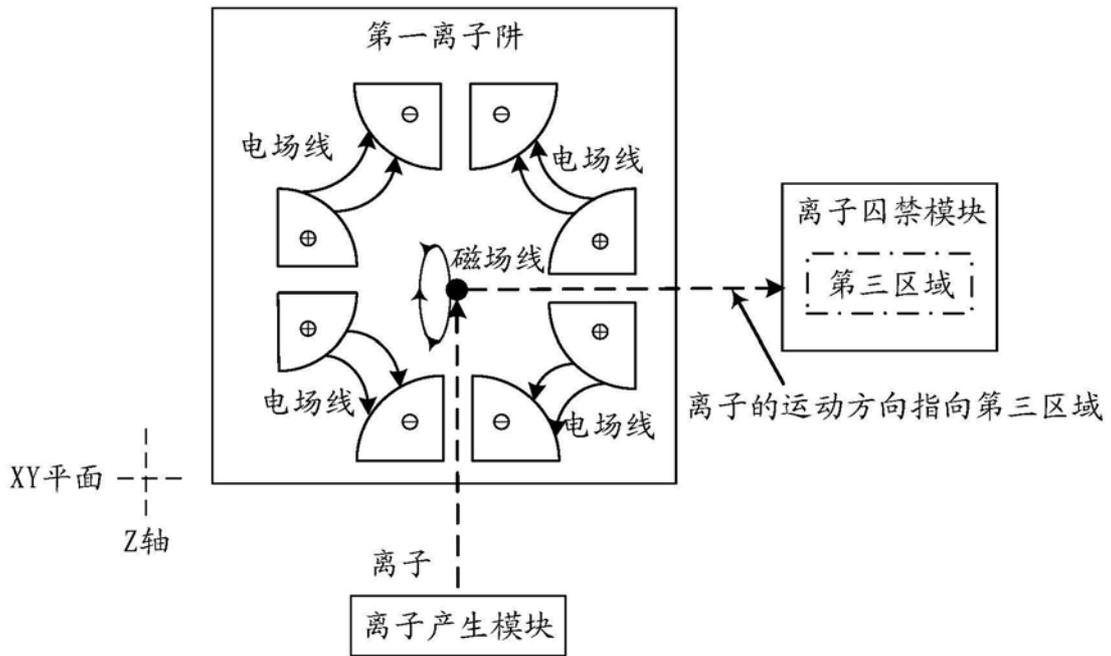


图6

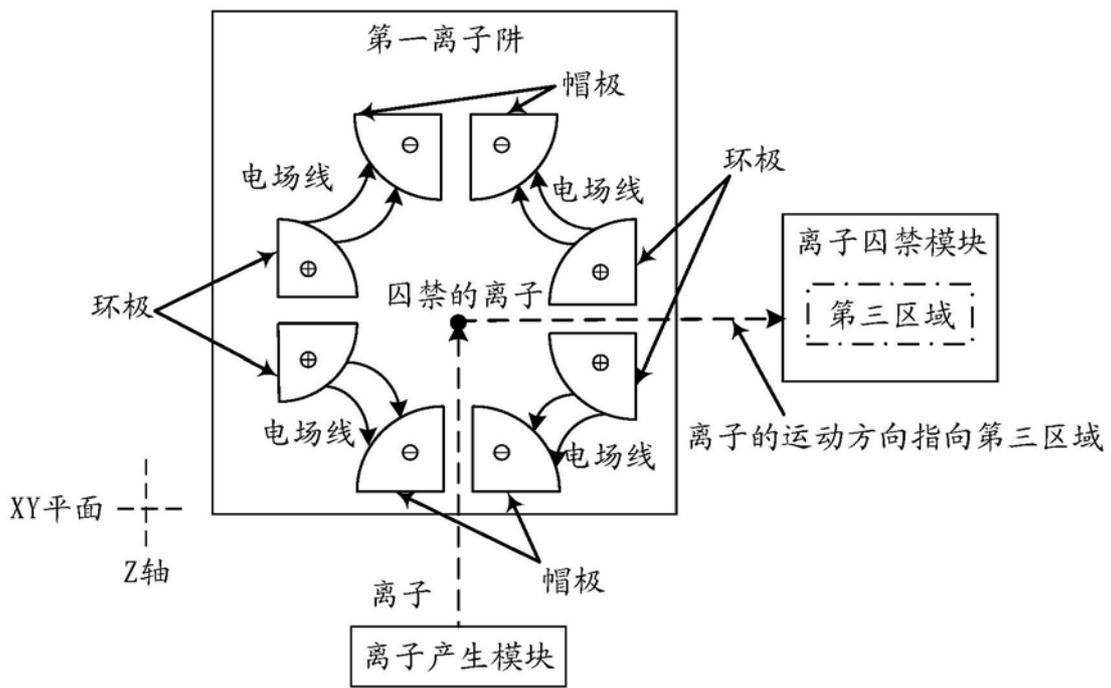


图7

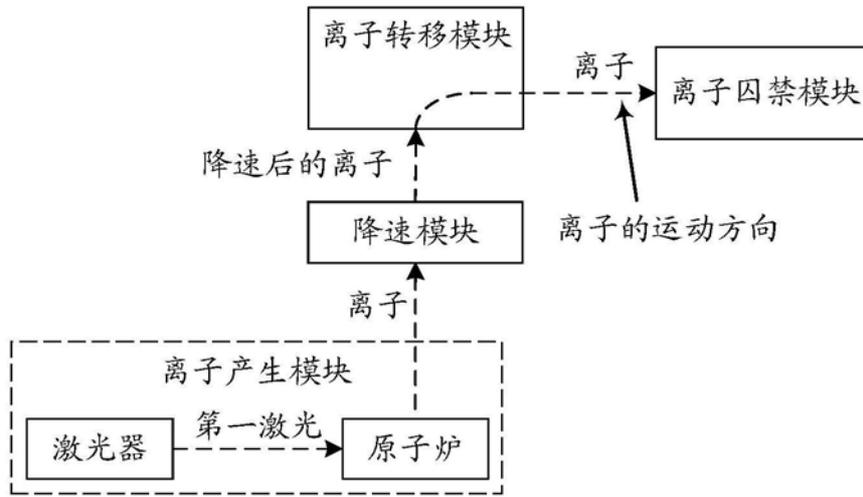


图8

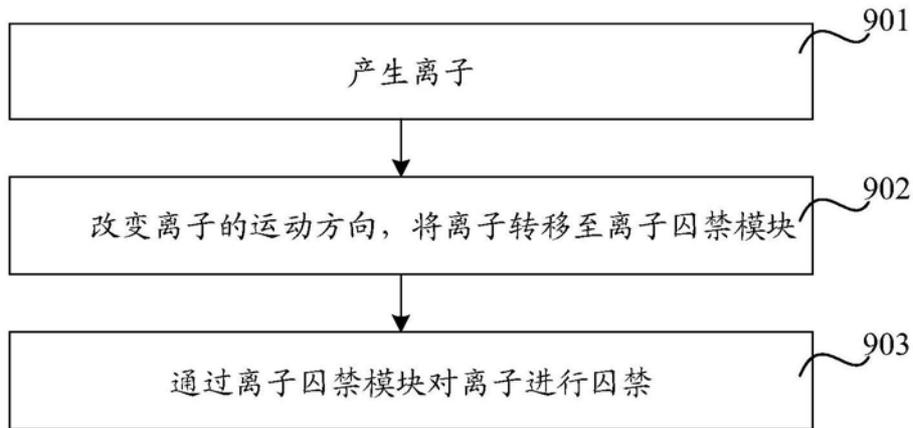


图9