



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115079552 B

(45) 授权公告日 2024.03.29

(21) 申请号 202210837128.8

CN 104317185 A, 2015.01.28

(22) 申请日 2022.07.15

CN 109714881 A, 2019.05.03

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 110515290 A, 2019.11.29

申请公布号 CN 115079552 A

CN 112304442 A, 2021.02.02

(43) 申请公布日 2022.09.20

US 2009302957 A1, 2009.12.10

(73) 专利权人 中国科学院国家授时中心

WO 2018225054 A1, 2018.12.13

地址 710600 陕西省西安市临潼区书院东路3号

薛文祥等.脉冲光抽运铷原子钟的Ramsey信号特性研究.《光子学报》.2020,第49卷(第5期),全文.

(72) 发明人 张首刚 孙富宇 李超 刘杰
李孝峰

Lingqiang Meng.Design and fabrication of a compact, high-performance interference-filter-based external-cavity diode laser for use in the China Space Station.《Chinese Optics Letters》.2022,第20卷(第2期),全文.

(74) 专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569
专利代理人 韩雪梅

审查员 耿燕华

(51) Int. Cl.

G04F 5/14 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103152040 A, 2013.06.12

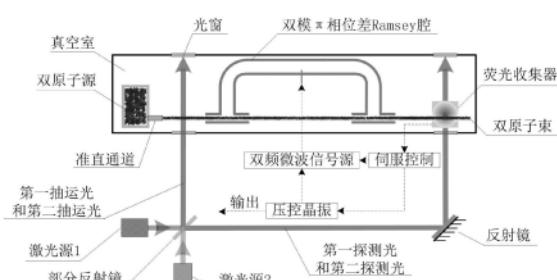
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔

(57) 摘要

本发明涉及一种原子钟及其双原子共用的Ramsey腔。该双原子钟包括：双原子源、双模 π 相位差Ramsey腔、双抽运激光、双探测激光以及荧光收集器；两种原子样品从同一个束源喷出，经过同一个原子准直通道形成共线双原子束；设计一个特殊的双模 π 相位差Ramsey腔，可以同时提供激励所述两种原子钟跃迁的 π 相位差微波磁场。以上特征使得本发明双原子钟的两种不同频率钟跃迁发生在相同的环境中，包括相同的温度、相同的Ramsey腔两臂不对称度和相同的静磁场等，有利于提升高精度频率比对测量水平，有利于构建小型高性能双原子束钟。同时，本发明还适用于单一原子样品的 π 相位差原子束钟的设计和实现。



1. 一种双原子钟,其特征在于,包括:双原子源、双模 π 相位差Ramsey腔、双抽运激光、双探测激光以及荧光收集器;

所述双原子源与所述双模 π 相位差Ramsey腔之间为原子态制备区,所述双模 π 相位差Ramsey腔为钟跃迁发生区,所述荧光收集器内为钟跃迁探测区,所述原子态制备区、钟跃迁发生区和钟跃迁探测区均位于真空中;

在所述原子态制备区,双原子样品从一个双原子源,经同一准直通道喷射而出,形成行进路径相同的共线双原子束;第一激光源与第二激光源分别发出第一激光束以及第二激光束;所述第一激光束包括第一抽运光和第一探测光,所述第二激光束包括第二抽运光以及第二探测光;所述第一抽运光用于与所述共线双原子束内第一原子发生电偶极共振,移除所述第一原子一个基态粒子数布居,完成所述第一原子的原子态制备;所述第二抽运光用于与所述共线双原子束内第二原子发生电偶极共振,移除所述第二原子一个基态粒子数布居,完成所述第二原子的原子态制备;

在所述钟跃迁发生区,根据所述第一原子的第一钟跃迁频率以及所述第二原子的第二钟跃迁频率设计双模 π 相位差Ramsey腔,完成原子态制备的第一原子与完成原子态制备的第二原子进入所述双模 π 相位差Ramsey腔中,在频率分别为第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场激励下完成各自磁偶极钟跃迁;

在钟跃迁探测区,所述第一探测光与完成钟跃迁后的第一原子发生电偶极共振,提取所述第一原子的第一钟跃迁信号;所述第二探测光与完成钟跃迁后的第二原子发生电偶极共振,提取所述第二原子的第二钟跃迁信号;

所述第一钟跃迁信号与所述第二钟跃迁信号进入钟频伺服控制模块,调控双频微波信号源和压控晶振,实现钟频伺服和稳定输出。

2. 根据权利要求1所述的双原子钟,其特征在于,所述第一抽运光、所述第二抽运光、所述第一探测光以及所述第二探测光均垂直于所述共线原子束的行进方向;

所述第一抽运光与所述第二抽运光共线或不共线;所述第一探测光以及所述第二探测光共线或不共线。

3. 根据权利要求1所述的双原子钟,其特征在于,所述原子态制备区、所述钟跃迁发生区以及所述原子钟跃迁探测区处于一个均匀静磁场环境。

4. 一种双原子共用的Ramsey腔,其特征在于,所述双原子共用的Ramsey腔为权利要求1中的所述双模 π 相位差Ramsey腔;

所述双模 π 相位差Ramsey腔的截面为矩形;

所述双模 π 相位差Ramsey腔工作在 TE_{10m} 和 TE_{10n} 两个不同奇次模式下,其中, TE_{10m} 模对应的频率为第一钟跃迁频率, TE_{10n} 模对应的频率为第二钟跃迁频率,m为激励第一原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数,n为激励第二原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数;m和n均为奇数。

5. 根据权利要求4所述的双原子共用的Ramsey腔,其特征在于,所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度L为:

$$L = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{f_2^2 - f_1^2}$$
;其中,c为光速, f_1 为所述第一钟跃迁频率, f_2 为第二钟跃迁频率;

所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度a为：

$$a = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{n^2 f_1^2 - m^2 f_2^2}。$$

6. 根据权利要求5所述的双原子共用的Ramsey腔,其特征在于,所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度满足 $c/(2f_1) < a < c/f_2$ 。

7. 根据权利要求5所述的双原子共用的Ramsey腔,其特征在于,通过改变所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度和宽度,使得所述双模 π 相位差Ramsey腔同时提供频率分别为所述第一钟跃迁频率以及所述第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场。

8. 根据权利要求5所述的双原子共用的Ramsey腔,其特征在于,在所述双模 π 相位差Ramsey腔中,采用同一个电天线激励产生所需的双模 π 相位差微波磁场;发生腔频频偏时,调节所述双模 π 相位差Ramsey腔的三维尺寸、调频杆和腔温,使腔频再次与原子钟频共振;所述原子钟频包括所述第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率。

一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔

技术领域

[0001] 本发明涉及时间频率领域,特别是涉及一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔。

背景技术

[0002] 原子钟提供了当今最高水平的频率测量和时间测量手段,助推了基础物理定律检验科学和导航定位等重大工程的革命性发展。对于原子钟性能提升的不断追求是时间频率领域和精密测量领域的一项重要课题。常见地,原子钟选用唯一的原子样品。近来的研究表明,通过使两种不同原子样品工作在尽可能相同的物理环境中,在此基础上执行钟频比较测量,可提供一种新的有潜力的精密测量平台(R. Bluhm等“Clock-comparison tests of Lorentz and CPT symmetry in space”Physical Review Letters,2002,88(9):090801;J. Guéna等“Improved tests of local position invariance using ^{87}Rb and ^{133}Cs fountains”Physical Review Letters,2012,109(8):080801)。如,法国巴黎天文台已研制成功铷/铯双原子喷泉钟装置(J. Guéna等“Demonstration of a dual alkali Rb/Cs fountain clock”IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2010,57(3):647-653)。然而,现行双原子钟内部仍采用两个不同的单模腔完成对两种不同原子的跃迁激励,尽管为了给两种原子提供尽可能一致的物理环境(如温度环境和静磁场环境等),将两个腔体加工集成在同一个金属载体中,其本质上仍是两个独立的腔体。这样的构造中,不同原子在各自腔体中完成钟跃迁,势必存在原子轨迹、温度和静磁环境等无法完全相同的问题,导致不同钟频的频移量无法严格类比,限制频率比较测量效果。

发明内容

[0003] 本发明的目的是提供一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔,以解决原子轨迹、温度和静磁环境等均不相同,导致钟频变化比较测量无法严格一致的问题。

[0004] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0005] 一种双原子钟,包括:双原子源、双模 π 相位差Ramsey腔、双抽运激光、双探测激光以及荧光收集器;

[0006] 所述双原子源与所述双模 π 相位差Ramsey腔之间为原子态制备区,所述双模 π 相位差Ramsey腔为钟跃迁发生区,所述荧光收集器内为钟跃迁探测区,所述原子态制备区、钟跃迁发生区和钟跃迁探测区均位于真空中;

[0007] 在所述原子态制备区,双原子样品从一个双原子源,经同一准直通道喷射而出,形成行进路径相同的共线双原子束;第一激光源与第二激光源分别发出第一激光束以及第二激光束;所述第一激光束包括第一抽运光和第一探测光,所述第二激光束包括第二抽运光以及第二探测光;所述第一抽运光用于与所述共线双原子束内第一原子发生电偶极共振,移除所述第一原子一个基态粒子数布居,完成所述第一原子的原子态制备;所述第二抽运光用于与所述共线双原子束内第二原子发生电偶极共振,移除所述第二原子一个基态粒子

数布居,完成所述第二原子的原子态制备;

[0008] 在所述钟跃迁发生区,根据所述第一原子的第一钟跃迁频率以及所述第二原子的第二钟跃迁频率设计双模 π 相位差Ramsey腔,完成原子态制备的第一原子与完成原子态制备的第二原子进入所述双模 π 相位差Ramsey腔中,在频率分别为第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场激励下完成各自磁偶极钟跃迁;

[0009] 在钟跃迁探测区,所述第一探测光与完成钟跃迁后的第一原子发生电偶极共振,提取所述第一原子的第一钟跃迁信号;所述第二探测光与完成钟跃迁后的第二原子发生电偶极共振,提取所述第二原子的第二钟跃迁信号;

[0010] 所述第一钟跃迁信号与所述第二钟跃迁信号进入钟频伺服控制模块,调控双频微波信号源和压控晶振,实现钟频伺服和稳定输出。

[0011] 可选的,所述第一抽运光、所述第二抽运光、所述第一探测光以及所述第二探测光均垂直于所述共线原子束的行进方向;

[0012] 所述第一抽运光与所述第二抽运光共线或不共线;所述第一探测光以及所述第二探测光共线或不共线。

[0013] 可选的,所述原子态制备区、所述钟跃迁发生区以及所述原子钟跃迁探测区处于一个均匀静磁场环境。

[0014] 一种双原子共用的Ramsey腔,所述双原子共用的Ramsey腔为所述双模 π 相位差Ramsey腔;

[0015] 所述双模 π 相位差Ramsey腔的截面为矩形;

[0016] 所述双模 π 相位差Ramsey腔工作在 TE_{10m} 和 TE_{10n} 两个不同奇次模式下,其中, TE_{10m} 模对应的频率为第一钟跃迁频率, TE_{10n} 模对应的频率为第二钟跃迁频率,m为激励第一原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数,n为激励第二原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数;m和n均为奇数。

[0017] 可选的,所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度L为:

[0018]
$$L = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{f_2^2 - f_1^2}$$
;其中,c为光速, f_1 为所述第一钟跃迁频率, f_2 为第二钟跃迁频率;

[0019] 所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度a为:

[0020]
$$a = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{n^2 f_1^2 - m^2 f_2^2}$$
。

[0021] 可选的,所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度满足 $c/(2f_1) < a < c/f_2$ 。

[0022] 可选的,通过改变所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度和宽度,使得所述双模 π 相位差Ramsey腔同时提供频率分别为所述第一钟跃迁频率以及所述第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场。

[0023] 可选的,在所述双模 π 相位差Ramsey腔中,采用同一个电天线激励产生所需的双模 π 相位差微波磁场;发生腔频频偏时,调节所述双模 π 相位差Ramsey腔的三维尺寸、调频杆和腔温,使腔频再次与原子钟频共振;所述原子钟频包括所述第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率。

[0024] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:本发明提供了一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔,两种原子样品从同一个束源喷出,经过同一个准直

通道形成共线双原子束,根据所述第一原子的第一钟跃迁频率以及所述第二原子的第二钟跃迁频率设计双模 π 相位差Ramsey腔,使其可以同时提供激励所述两种原子钟跃迁的两种 π 相位差微波磁场。前述构造中,双原子钟的两种不同频率钟跃迁得以发生在相同的物理环境中,包括相同的温度、相同的Ramsey腔两臂不对称度和相同的静磁场等,有利于提升高精度频率比对测量水平,有利于构建小型高性能双原子束钟。同时,本发明还适用于单一原子样品的 π 相位差原子束钟的设计和实现。

附图说明

[0025] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0026] 图1为本发明所提供的双原子钟结构示意图;

[0027] 图2为本发明具体实施例所提供的双原子及其能级结构示意图;图2(a)为本发明具体实施例所提供的⁸⁷Rb原子能级图,图2(b)为本发明具体实施例所提供的¹³³Cs原子能级图;

[0028] 图3为本发明具体实施例所提供的⁸⁷Rb和¹³³Cs原子共用的Ramsey腔的腔响应激励和腔频调节过程图;图3(a)为本发明具体实施例所提供的双模 π 相位差Ramsey腔电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)与电天线长度的关系图,其中,“圆圈+线”表示用于激励⁸⁷Rb原子钟跃迁的TE₁₀₅模,“方框+线”表示用于激励¹³³Cs原子钟跃迁的TE₁₀₁₁模,虚线表示理想激励情况对应的驻波比为1的情况;图3(b)为本发明具体实施例所提供的双模 π 相位差Ramsey腔腔频失谐与腔纵向长度之间的关系图,其中,“圆圈+线”表示TE₁₀₅模频率随腔长的变化关系,“方框+线”表示TE₁₀₁₁模频率随腔长的变化关系;图3(c)为本发明具体实施例所提供的双模 π 相位差Ramsey腔的TE₁₀₅模腔频与调频杆长度的关系图;图3(d)为本发明具体实施例所提供的双模 π 相位差Ramsey腔的TE₁₀₁₁模腔频与调频杆长度的关系图。

具体实施方式

[0029] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0030] 本发明的目的是提供一种双原子钟及其双原子共用的Ramsey腔,能够提高双原子钟的频率比对测量精度,提出的设计方法还可用于构建单一原子样品的 π 相位差原子束钟。

[0031] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0032] 图1为本发明所提供的双原子钟结构示意图,如图1所示,一种双原子钟,包括:双原子源、双模 π 相位差Ramsey腔、双抽运激光、双探测激光,以及荧光收集器;

[0033] 所述双原子源与所述双模 π 相位差Ramsey腔之间为原子态制备区,所述双模 π 相位差Ramsey腔为钟跃迁发生区,所述荧光收集器内为钟跃迁探测区,所述原子态制备区、钟跃

迁发生区和钟跃迁探测区均位于真空中；

[0034] 在所述原子态制备区，双原子样品从一个双原子源，经同一准直通道喷射而出，形成行进路径相同的共线双原子束；第一激光源与第二激光源分别发出第一激光束以及第二激光束；所述第一激光束包括第一抽运光和第一探测光，所述第二激光束包括第二抽运光以及第二探测光；所述第一抽运光用于与所述共线双原子束内第一原子发生电偶极共振，移除所述第一原子一个基态粒子数布居，完成所述第一原子的原子态制备；所述第二抽运光用于与所述共线双原子束内第二原子发生电偶极共振，移除所述第二原子一个基态粒子数布居，完成所述第二原子的原子态制备；

[0035] 在所述钟跃迁发生区，根据所述第一原子的第一钟跃迁频率以及所述第二原子的第二钟跃迁频率设计双模 π 相位差Ramsey腔，完成原子态制备的第一原子与完成原子态制备的第二原子进入所述双模 π 相位差Ramsey腔中，在频率分别为第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场激励下完成各自磁偶极钟跃迁；

[0036] 在钟跃迁探测区，所述第一探测光与完成钟跃迁后的第一原子发生电偶极共振，提取所述第一原子的第一钟跃迁信号；所述第二探测光与完成钟跃迁后的第二原子发生电偶极共振，提取所述第二原子的第二钟跃迁信号；

[0037] 所述第一钟跃迁信号与所述第二钟跃迁信号进入钟频伺服控制模块，调控双频微波信号源和压控晶振，实现钟频伺服和稳定输出。

[0038] 在实际应用中，所述第一激光束通过部分反射镜，生成所述第一抽运光以及所述第一探测光；所述第二激光束通过部分反射镜，生成所述第二抽运光以及所述第二探测光。

[0039] 在实际应用中，所述第一抽运光、所述第二抽运光、所述第一探测光以及所述第二探测光均垂直于所述共线原子束的行进方向；

[0040] 所述第一抽运光与所述第二抽运光共线或不共线；所述第一探测光以及所述第二探测光共线或不共线。

[0041] 在实际应用中，所述原子态制备区、所述钟跃迁发生区以及所述原子钟跃迁探测区处于一个均匀静磁场环境。

[0042] 一种双原子共用的Ramsey腔，所述双原子共用的Ramsey腔为所述双模 π 相位差Ramsey腔；

[0043] 所述双模 π 相位差Ramsey腔的截面为矩形；

[0044] 所述双模 π 相位差Ramsey腔工作在 TE_{10m} 和 TE_{10n} 两个不同奇次模式下，其中， TE_{10m} 模对应的频率为第一钟跃迁频率， TE_{10n} 模对应的频率为第二钟跃迁频率， m 为激励第一原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数， n 为激励第二原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数； m 和 n 均为奇数。

[0045] 在实际应用中，所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度 L 为：

[0046]
$$L = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{f_2^2 - f_1^2}$$
；其中， c 为光速， f_1 为所述第一钟跃迁频率， f_2 为第二钟跃迁频率；

[0047] 所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度 a 为：

[0048]
$$a = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{n^2 f_1^2 - m^2 f_2^2}$$
。

[0049] 在实际应用中，所述双模 π 相位差Ramsey腔的宽度满足 $c/(2f_1) < a < c/f_2$ 。

[0050] 在实际应用中,通过改变所述双模 π 相位差Ramsey腔的长度和宽度,使得所述双模 π 相位差Ramsey腔同时提供频率分别为所述第一钟跃迁频率以及所述第二钟跃迁频率的 π 相位差微波磁场。

[0051] 在实际应用中,在所述双模 π 相位差Ramsey腔中,采用同一个电天线激励产生所需的双模 π 相位差微波磁场;发生腔频频偏时,调节所述双模 π 相位差Ramsey腔的三维尺寸、调频杆和腔温,使腔频再次与原子钟频共振;所述原子钟频包括所述第一钟跃迁频率以及第二钟跃迁频率。

[0052] 基于本发明所提供的双原子钟结构,其实现方法包括以下步骤:

[0053] 步骤1:选定所需的两种原子样品,据此确定第一种原子的钟跃迁频率 f_1 和第二种原子的钟跃迁频率 f_2 ,进一步选定实现第一种原子态制备的第一抽运光和实现第一种原子钟跃迁信号提取的第一探测光,以及实现第二种原子态制备的第二抽运光和实现第二种原子钟跃迁信号提取的第二探测光。所述第一抽运光和第一探测光来自同一激光源1,所述第二抽运光和第二探测光来自同一激光源2。第一抽运光和第二抽运光可以共线也可以不共线;第一探测光和第二探测光可以共线也可以不共线。

[0054] 步骤2:所述两种原子样品从一个双原子源,经同一准直通道喷射而出,形成行进路径相同的共线双原子束。在原子态制备区,第一抽运光和第二抽运光垂直于原子束行进方向,分别与第一种原子和第二种原子发生电偶极共振,移除所述第一种原子和第二种原子的其中一个基态粒子数布居,完成两种原子态的制备。

[0055] 步骤3:完成态制备后的所述两种原子进入到一个双模 π 相位差Ramsey腔中,在频率分别为 f_1 和 f_2 的 π 相位差微波磁场激励下完成各自钟跃迁,实现高分辨率原子频率识别。

[0056] 步骤4:所述双模 π 相位差Ramsey腔的截面为矩形,被设计工作在 TE_{10m} (对应频率为 f_1)和 TE_{10n} (对应频率为 f_2)两个不同奇次模式下,其中m和n分别为激励第一种原子和第二种原子发生磁偶极钟跃迁所需的微波场纵向模式数,均为奇数。

[0057] 由于给定模式对应的频率是所述Ramsey腔宽度a和长度L的函数,采用下式计算得到所述两个自由度—a和L的值,所述Ramsey腔即能够同时提供频率分别为 f_1 和 f_2 的 π 相位差微波磁场,满足所述两种不同原子的钟跃迁所需: $a = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{n^2 f_1^2 - m^2 f_2^2}$ 和 $L = 0.5c\sqrt{n^2 - m^2} / \sqrt{f_2^2 - f_1^2}$,其中c为光速。

[0058] 为了避免出现模式简并,所述Ramsey腔宽度a应满足 $c/(2f_1) < a < c/f_2$ 。

[0059] 步骤5:在所述Ramsey腔中,采用同一个电天线激励产生所需的双模 π 相位差微波磁场。发生腔频频偏时,调节腔三维尺寸、调频杆和腔温,使腔频再次与原子钟频共振。

[0060] 步骤6:在原子钟跃迁探测区,第一探测光和第二探测光垂直于原子束行进方向,分别与发生钟跃迁后的第一种原子和第二种原子发生电偶极共振,实现钟跃迁信号提取。

[0061] 步骤7:提取的钟跃迁信号经过低噪前置放大后进入到钟频伺服控制模块,调控双频微波信号源和压控晶振,实现钟频伺服和稳定输出。

[0062] 步骤8:所述原子态制备、 π 相位差微波磁场激励下的钟跃迁和原子钟跃迁探测均在真空环境中进行,抽运光和探测光通过密封所述真空室的光窗实现向真空室中的传输。

[0063] 步骤9:所述原子态制备区、 π 相位差微波磁场激励下的钟跃迁区域和原子钟跃迁探测区均处于一个均匀弱静磁场环境,所述弱静磁场的主要作用是提高原子抽运效率和提

供量子化轴。

[0064] 因此,本发明包括以下几个特征:

[0065] (1) 两种不同原子样品装载于同一个束源中,加热后经过一个共用的准直通道从束源喷出,形成两个共线的双原子束,共享相同的行进路径,进入到双原子共用的Ramsey腔中。

[0066] (2) 所述双原子共用的Ramsey腔为双模 π 相位差Ramsey腔,能够同时工作在两个不同的奇次模式,每个所述奇次模式对应的频率都准确为其中一种原子的钟跃迁频率,所述两个不同的奇次模式采用同一个电天线予以激励。

[0067] (3) 共用Ramsey腔是指本发明采用单一的所述双模 π 相位差Ramsey腔,同时提供激励所述两种不同原子的钟跃迁所需的 π 相位差微波磁场,所述两种钟跃迁发生在完全相同的区域。

[0068] (4) 所述不同的奇次模式对应的频率,可通过改变所述双模 π 相位差Ramsey腔三维尺寸进行粗调,通过调节位于所述双模 π 相位差Ramsey腔中央位置的调频杆或腔体温度进行细调,以实现所述频率与各自钟跃迁频率共振。

[0069] (5) 通过所述电天线向所述双模 π 相位差Ramsey腔中馈入的双频微波经同一个压控晶振倍频产生。

[0070] (6) 所述双原子束在进入到所述双模 π 相位差Ramsey腔之前,均通过光抽运方式实现原子态制备。经历所述钟跃迁后,均通过光探测方式实现钟跃迁信号提取。

[0071] (7) 对于任何一种原子,所述原子态制备所需的抽运光和所述钟跃迁信号提取所需的探测光,既可以是同频光,也可以是非同频光。

[0072] (8) 本发明双原子钟既能够以双原子钟形式工作,也能够以单一原子钟形式工作。

[0073] 以工作双原子样品为铷87(^{87}Rb)和铯133(^{133}Cs)为例,所述 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 装载于同一个束源中,经过同一个准直通道,形成共线双原子束。图2为本发明所提供的双原子及其能级结构示意图,图2(a)为本发明所提供的 ^{87}Rb 原子能级图,图2(b)为本发明所提供的 ^{133}Cs 原子能级图,双原子钟所用 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 原子能级图如图2所示,其中,第一种原子 ^{87}Rb 的钟跃迁频率 $f_1 \approx 6.835\text{GHz}$;第二种原子 ^{133}Cs 的钟跃迁频率 $f_2 \approx 9.193\text{GHz}$;第一抽运光和第一探测光频率相同,均为 ^{87}Rb D2线780nm;第二抽运光和第二探测光频率相同,均为 ^{133}Cs D2线852nm。

[0074] 出于简化双原子钟装置目的,本实施例中第一抽运光与第二抽运光共线,第一探测光与第二探测光共线。在原子态制备区,第一抽运光和第二抽运光垂直于原子束行进方向,分别与第一种原子 ^{87}Rb 和第二种原子 ^{133}Cs 发生电偶极共振,移除 ^{87}Rb 基态原子中 $F=2$ 能态的布居和 ^{133}Cs 基态原子中 $F=4$ 能态的布居,完成双原子钟中两种原子态的制备。

[0075] 完成态制备后的 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 原子进入到一个双模 π 相位差Ramsey腔中,在频率分别为 $f_1 \approx 6.835\text{GHz}$ 和 $f_2 \approx 9.193\text{GHz}$ 的 π 相位差微波磁场激励下完成各自钟跃迁,实现高分辨率原子频率识别。所述双模 π 相位差Ramsey腔的截面为矩形,被设计工作在 TE_{105} (对应频率为 $f_1 \approx 6.835\text{GHz}$)和 TE_{1011} (对应频率为 $f_2 \approx 9.193\text{GHz}$)两个不同奇次模式下,腔的宽度 $a = 24.686\text{mm}$ 、纵向长度 $L = 238.907\text{mm}$ 。

[0076] 据上完成双模 π 相位差Ramsey腔的原理性设计后,还需要开展另外两项重要工作,以确保在“正确的”两个频率($f_1 \approx 6.835\text{GHz}$ 和 $f_2 \approx 9.193\text{GHz}$)处成功激励起所需的工作模式(TE_{105} 模和 TE_{1011} 模)。这两项工作分别是电天线的设计和腔频调节。图3为本发明所提供的

^{87}Rb 和 ^{133}Cs 原子共用的Ramsey腔的腔响应激励和腔频调节过程图,图3(a)为本发明所提供的电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)与电天线长度的关系图,由图3(a)可见,长1.6mm的电天线可成功在所述Ramsey腔中同时激励起 TE_{105} 模和 TE_{1011} 模的电磁场,图3(a)表示不同长度电天线激励下, TE_{105} 模和 TE_{1011} 模的驻波比,图中“圆圈+线”表示用于激励 ^{87}Rb 原子钟跃迁的 TE_{105} 模,“方框+线”表示用于激励 ^{133}Cs 原子钟跃迁的 TE_{1011} 模,虚线表示理想激励情况对应的驻波比为1的情况;图3(b)为本发明所提供的双模 π 相位差Ramsey腔腔失谐与腔的纵向长度之间的关系图,由图3(b)可见, TE_{105} 模和 TE_{1011} 模对应的频率可通过改变腔体纵向长度进行宽范围粗调,图3(b)反映了腔频粗调过程;图3(c)为本发明所提供的 TE_{105} 模腔频与调频杆长度的关系图,图3(c)表示不同长度调频杆对 TE_{105} 模腔频的细调过程;图3(d)为本发明所提供的 TE_{1011} 模腔频与调频杆长度的关系图,图3(d)表示不同长度调频杆对 TE_{1011} 模腔频的细调过程,由图3(c)和图3(d)可见, TE_{105} 模和 TE_{1011} 模对应的频率可通过改变调频杆长度进行小范围细调,最终实现所述两个模式对应的频率准确为所述两种原子的钟跃迁频率,完成本发明双原子钟中至关重要的双钟跃迁激励,亦即高分辨率双原子频率识别。

[0077] 在双原子钟跃迁探测区,第一探测光和第二探测光垂直于原子束行进方向,分别与发生钟跃迁后的 ^{87}Rb 和 ^{133}Cs 原子发生电偶极共振,实现钟跃迁信号提取。所述钟跃迁信号经低噪前置放大后进入到钟频伺服控制模块,调控双频微波信号源和压控晶振,实现钟频伺服和稳定输出。

[0078] 本发明设计选用了一个束源、一个束准直通道和一个双模Ramsey腔,允许两种原子在同一个腔体中完成各自钟跃迁,且两种钟跃迁发生在相同的物理环境中,具有性能优、体积小等潜在优势。

[0079] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。

[0080] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

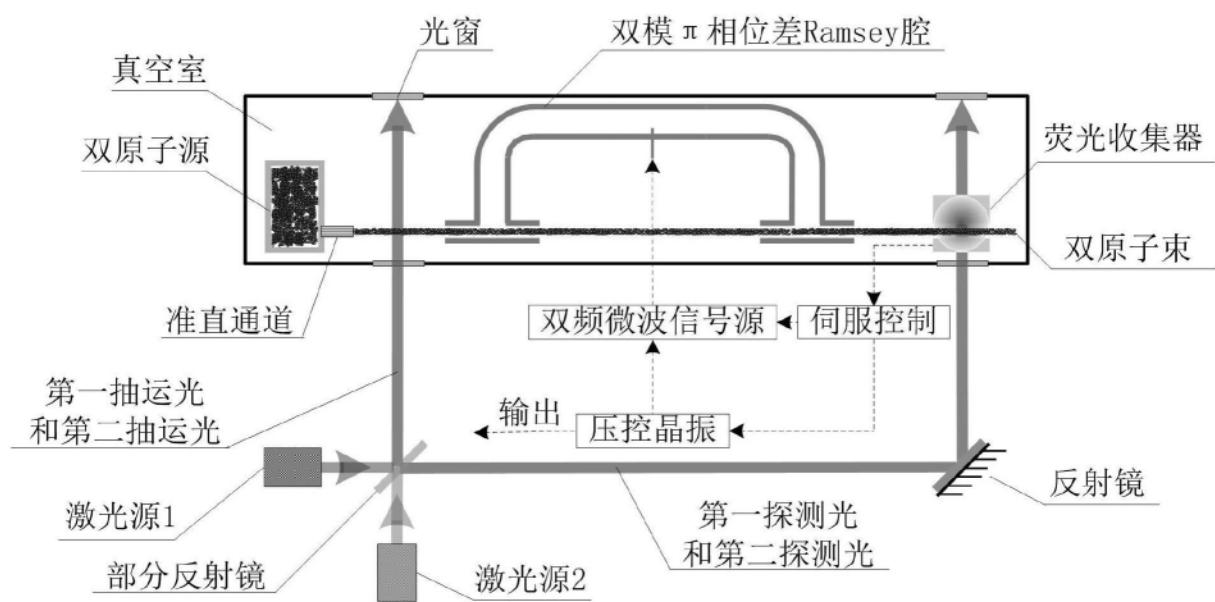


图1

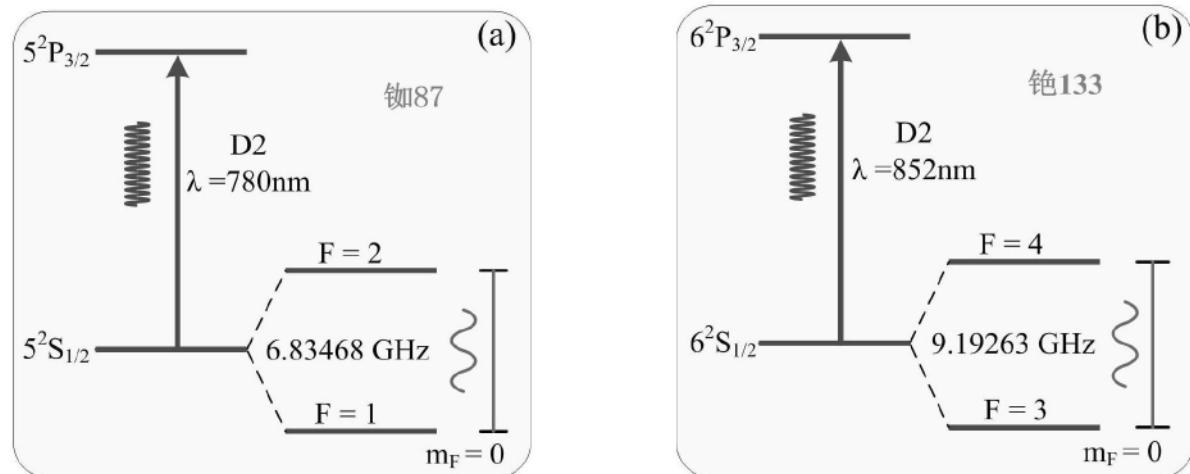


图2

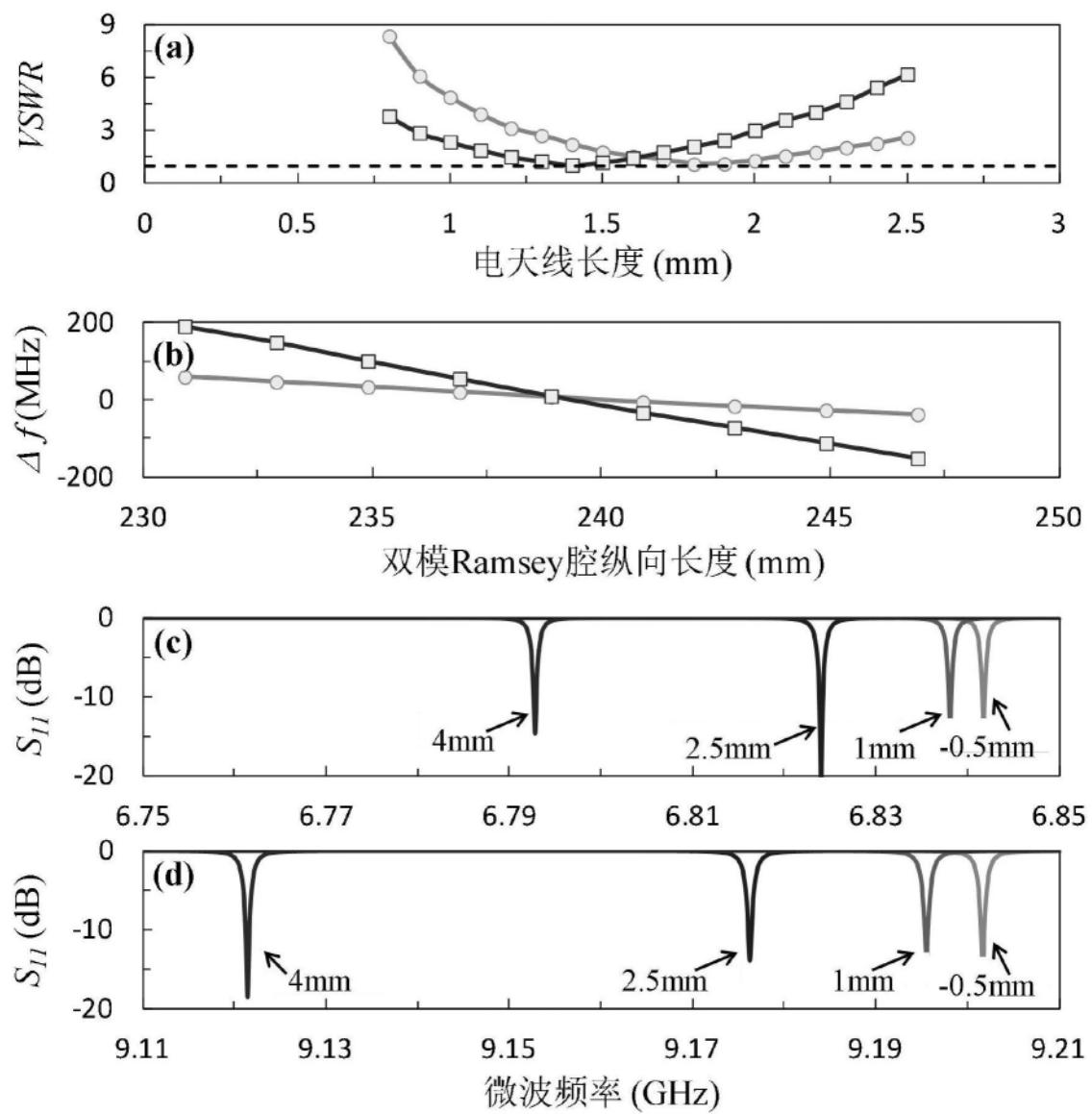


图3