

空间冷原子钟原理样机地面测试结果

屈求智 汪 斌 吕德胜 李 唐 李 琳 赵剑波 刘 亮*

中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

摘要 介绍了空间激光冷却原子钟地面原理样机的实验进展。该样机是以在空间微重力条件下应用为目标而研制的超高精度激光冷却铷原子钟, 主要由物理单元、光学单元、微波单元和控制单元四个部分组成。该原理样机已经成功研制了空间冷原子钟所需要的超高真空系统、激光冷却光学平台、高性能微波源以及微波环形腔, 实现了全过程自动运行, 并获得了在地面重力条件下标志原子钟信号精度的 Ramsey 条纹, 确定了高精度空间冷原子钟的主要科学参数和技术指标, 为进一步空间工程应用奠定了科学和技术基础。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 原子频标; 集成光学; 空间应用

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902006

Principle and Progress of Cold Atom Clock in Space

Qu Qiuzhi Wang Bin Lü Desheng Li Tang Li Lin Zhao Jianbo Liu Liang

Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The design of a cold atom clock in space (CACS) and its recent progress are described. The CACS is a high precision cold Rubidium atom clock for the application in microgravity environment, which has four parts, including physics, laser source, microwave source, and control system. The first CACS clock science run has been achieved as described. The essential operations of a space cold atom rubidium clock have been demonstrated in the prototype system. The key results of a clock including the ultrahigh vacuum degree, the atomic temperature, and the linewidth of the Ramsey fringes, satisfy the demands of a space cold atom clock. Based on this prototype, an engineering model for space application has been under development.

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; atomic frequency standard; integrated optics; space application

OCIS codes 020.3320; 130.3120; 140.3425; 120.6085

1 引 言

进入 21 世纪, 随着激光冷却和囚禁技术的发展, 激光冷却超冷原子喷泉钟成为地面上精度最高的原子钟, 并成为国际秒定义的一级频率标准, 其准确度可达 10^{-16} 量级^[1-3]。近年来, 激光冷却技术与空间微重力环境相结合, 可望在空间获得比地面中心峰线宽窄一个数量级的 Ramsey 谱线, 是原子频标发展史上又一个重大的技术突破。

由于高精度空间原子钟在计量学、守时、全球导航定位系统、基本物理常数的精密测量、验证爱因斯坦引力红移效应等领域都有非常重大的科学研究和工程应用价值, 国际上争相开展空间高精度原子钟的研究计划, 其中最主要的包括欧洲空间局(ESA)支持的冷原子钟(PHARAO)计划^[4-5], 美国宇航局(NASA)支持的空

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(11034008, 11274324)、中国科学院重点研究项目(KJZD-EW-W02)、中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)

作者简介: 屈求智(1977—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事空间冷原子物理和原子频标方面的研究。

E-mail: quqiuzhi@siom.ac.cn

导师简介: 刘 亮(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事冷原子物理和原子频标等方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

间钟(PARCS)计划^[6]和(RACE)计划^[7]。中国科学院上海光机所从2000年起,就开始进行小型化冷原子铷钟和空间冷原子钟实现方案等方面的研究^[8-14],本文介绍了近年来上海光机所空间冷原子钟(CACS)计划的原理样机的研制和实验进展,描述了其工作原理和结构组成,并以此为基础开展的空间冷原子钟工程化技术研究。

2 空间冷原子钟工作原理

空间冷原子钟是从地面冷原子喷泉钟的基础上发展而来。地面喷泉原子钟的工作原理简单来说是利用激光囚禁和冷却技术获得超冷原子团,并采用移动光学黏团(molasses)技术将冷原子团向上抛射,在重力的作用下形成冷原子喷泉。经过选态腔后,处于纯量子基态上的原子在上升和下降途中两次经过同一微波腔,与微波场两次相互作用后产生量子叠加态,经由双能级探测器可测出处于不同量子态上的原子数,从而算出原子跃迁几率,扫描微波频率即可获得原子钟的鉴频谱线 Ramsey 条纹。由于受重力限制,在地面上原子团运动速度不能过慢,原子穿越分离场的时间间隔一般在秒量级,获得的谱线宽度约为几个赫兹。

与地面喷泉原子钟不同,在微重力环境下,采用环形腔结构的空间冷原子钟可以使超冷原子团沿空间直线做超慢速匀速直线运动,依次经过两个场形相同的分离微波腔,即可获得相应的 Ramsey 条纹,如图 1 所示。由于 Ramsey 谱线宽度反比于原子穿越分离场时间,因此在有限的原子寿命时间内,空间冷原子钟谱线宽度可以比地面冷原子喷泉钟减小到十分之一以下。同时,由于微波腔相移正比于原子团运动速度,原子团运动速度减慢也可使腔相移相应减小。因此,利用空间微重力环境带来的优点,空间冷原子钟从原理上可获得比地面喷泉原子钟更高的精度。由于真空度、原子寿命等其他一些因素的限制,原子穿越分离场的时间间隔选在十秒量级较为合理,所获得的 Ramsey 谱线中心峰线宽可达 0.1 Hz。考虑到其他影响原子钟准确度的因素,空间冷原子钟预期准确度可比地面冷原子钟提高约半个数量级,可达到优于 10^{-16} 。

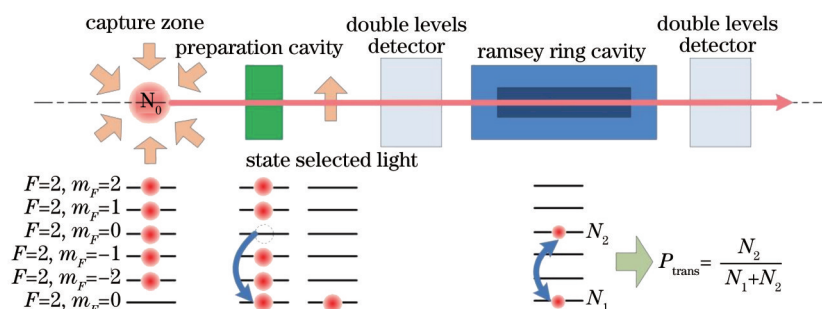


图 1 空间原子钟工作原理(其中 N_0 为俘获原子总数, N_1 为基态 $F=1, m_F=0$ 上的原子数, N_2 为基态 $F=2, m_F=0$ 上的原子数, P_{trans} 为原子跃迁几率)

Fig.1 Operation sequence of a space cold atom clock (N_0 is the trapped atom number, N_1, N_2 are the final atom number of state $F=1, m_F=0$, and $F=2, m_F=0$, separately, P_{trans} is the transition probability)

3 空间冷原子钟原理样机的实现

空间冷原子钟样机主要包括 4 个子系统,物理系统、激光系统、微波系统和控制系统,如图 2 所示。样机在地面实验时,物理系统竖直放置,原子冷却囚禁区位于下方。

物理系统整体外观为圆柱形,总体高度约 1.3 m,直径约 0.4 m。系统最外层为五层(外两层内三层)玻莫合金磁屏蔽,中间是真空管道,真空管道下方连接 40 L/s 离子泵、下真空规和铷源,往上依次是冷原子俘获区、选态腔、下探测区、环形微波腔、上探测区,最上方连接着一个 2 L/s 的离子泵和上真空规。

铷源位于冷原子俘获区一侧窗口,其释放的 Rb^{87} 原子通过小型法兰进入真空腔体,在俘获区被 6 束相互正交对射的冷却光囚禁,经过激光多普勒冷却、偏振梯度冷却和绝热冷却至超低温(微开尔文量级),同时改变上下冷却光的失谐量,使之获得向上的初速度而上抛。为了使上抛的冷原子团精确的沿真空管道中心轴传播,6 束冷却光由 6 根单模保偏光纤经过 6 组激光准直扩束模块输入,该模块设计如图 3 所示:光纤通过 FC 接头安装在底座(20)上,激光经偏振分光棱镜(PBS)(12)反射后依次经过透镜(11)、(9)、(5)然后经过波片(1)输出。由于对输出光束有准直性、基准面垂直性、光心对准等要求,需要对光学系统进行安装调整,安装过

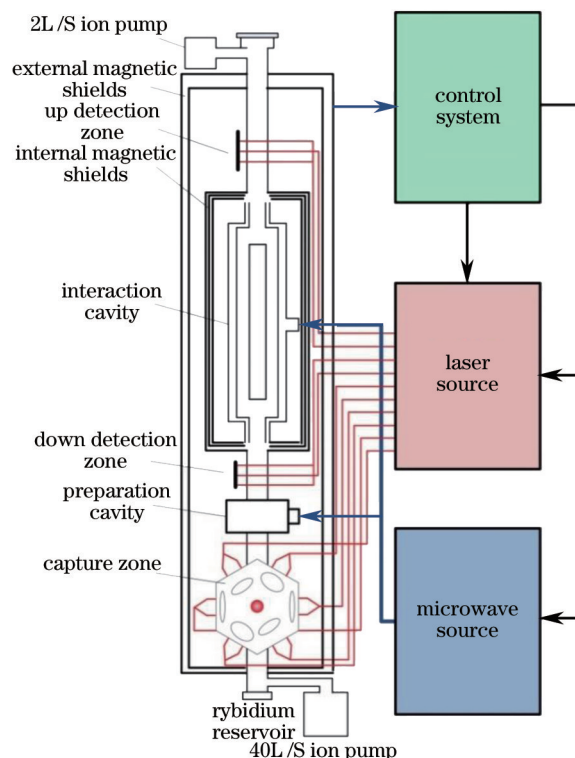


图2 空间冷原子钟原理样机结构示意图。样机包括4大子系统:激光系统通过光纤为物理系统提供10束单模保偏激光、微波系统通过射频线对微波腔输入6.8 GHz微波信号,控制系统管理整个原子钟按即定时序工作,并实现整机自动循环运行。

Fig.2 Schematic of the CACS clock. The clock includes 4 sub-systems: the laser source provides ten laser beams to the rubidium tube to manipulate the atoms. The microwave source provides two 6.8 GHz signals to the preparation cavity and interaction cavity. The computer control system manages the clock operation

程中透镜(5)、(9)、(11)是固定器件,光纤输入底座(20)位置前后左右三维可调,其相对偏振分束棱镜(12)入射面的角度二维可调,平板(14)用于安装光电管检测对射激光功率。波片(1)可根据冷原子俘获方式使用四分之一或二分之一波片,输出口径为20 mm的准直圆偏光或线偏光,扩散角小于 $40 \mu\text{rad}$,偏心角小于 0.5 mrad 。

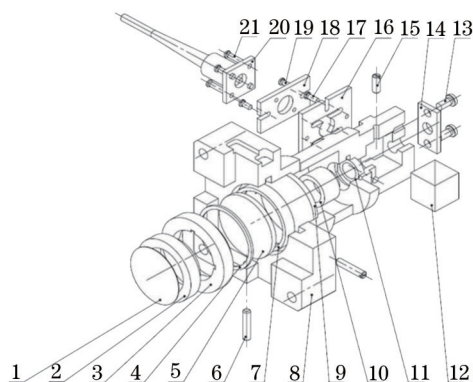


图3 激光准直扩束模块结构图

Fig.3 Structure of the laser beam transforming module

图4所示为微波选态腔和 Ramsey 环形腔的剖面图,其中选态腔采用圆柱形谐振腔,电磁场模式为 TE011,耦合方式为采用环耦合,直径69.2 mm,高度34.6 mm,中心共振频率可以通过调整微波腔盖的尺寸和微波耦合环的阻抗匹配来调节,上下两端为圆柱形截止波导。Ramsey腔采用了环形腔结构,由上海光机所与电子科技大学联合研制成功,整个腔体由无氧铜材料制作而成,由四个矩形波导首尾相接,微波信号从两个长边中心馈入,然后沿两个方向传播,形成环状驻波场,两侧为矩形截止波导。这种设计的优点是结构对称,微波的循环传播减小了微波的相位分布误差,具有较小的相移。微波模式为 TE201,共振频率为6.8371 GHz,固有品质因子 Q 值大于10000。

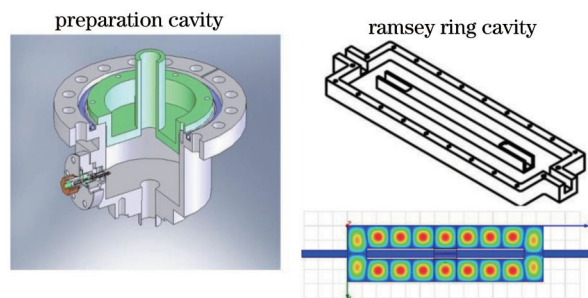


图4 选态腔和环形微波腔结构示意图,右下为环形腔内电场分布图

Fig.4 Structure of the preparation cavity and Ramsey cavity

原子双能级探测区处于磁屏蔽内部,受空间尺寸严格限制,且需要同时产生四个不同形状要求的激光场,光机设计和光学装调都有很大难度。为此研发了原子双能级探测器,如图5所示。两束激光经光纤连接到装置的FC光纤底座,激光频率分别对应 $F=2 \rightarrow F'=3$ 和 $F=1 \rightarrow F'=2$ 的原子跃迁频率,光纤出射的发散光经过焦距 70 mm 的球面透镜(3)、(4)后准直为光束直径 20 mm 左右的高斯光束,再经过光阑整形为 $13 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 和 $13 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的矩形光束,两束激光经过 PBS(5)、反射镜(7)、(8)的反射后水平出射,(9)、(10)、(11)为四分之一波片,使最终和冷原子相互作用的探测光是圆偏振光,利用循环跃迁提高探测荧光效率。行波场则由反射镜局部涂黑产生。原子荧光由成像透镜组收集至光电管(S1337-1010BR, Hamamatsu Co.),经弱电流放大(放大倍数 $1 \times 10^9 \text{ V/A}$)输出原子飞行时间(TOF)信号。

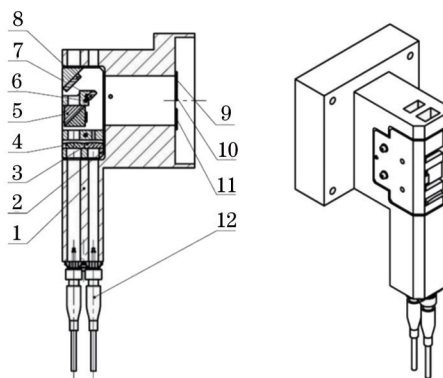


图5 原子双能级探测光源

Fig.5 Structure of the detecting laser source

为适应空间工程应用需求,激光冷却光学系统要在有限的重量和功耗限制下为物理系统提供 10 路稳定的单模保偏稳频激光,分别用于激光冷却、选态和探测。本课题组在国内首次采用了激光冷却集成化光机设计,成功研制了小型激光冷却平台^[15],将包括两台外腔稳频激光器、两台注入锁定激光器、两路饱和吸收稳频光路、七只声光调制器和十条光纤耦合光路集成在一块 $80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$ 的铝板上,制作成可搬运、具备高稳定性能的光学平台,为空间冷原子钟样机提供稳定可靠的光源。自主研发的高性能微波频率综合器可独立输出两路基于高稳晶振 BVA8607 的 6.8 GHz 微波信号,分别作用于物理系统的选态腔和微波环形腔,该微波源可在 10 MHz 范围内连续可调,频率分辨率为 $7 \times 10^{-7} \text{ Hz}$,微波输出功率可在 $(-20 \sim -80) \text{ dBm}$ 范围内可调,可调精度为 0.03 dB。输入到 Ramsey 腔的微波信号可控制关断,关断隔离度为 65dB。同时,该微波源还可以通过外接 5 MHz 信号产生所需微波信号。CACS 控制系统管理整个原子钟按设定时序运行,包括激光、微波的自动开关,探测信号的采集和数据处理,根据误差信号产生反馈信号用于原子钟闭环等等。采用了 NI 公司的 Compact Real-time Input/Output (CRIO) 控制器作为自动控制单元,由主机发出的程控指令可下载到 CRIO 的缓存器上,由 CRIO 自带的 Field Programmable Gate Array (FPGA) 自动执行,从而实现整套系统脱离主机自动运行。CRIO 控制时间分辨率为 $1 \mu\text{s}$ 。

4 地面测试结果

经过近2年的地面测试,空间冷原子钟地面样机物理系统真空度平均为 1.2×10^{-7} Pa,物理系统内部剩余磁场小于1.5 nT。利用绝热冷却原子技术获得了温度为1.5 μ K左右的超冷原子团^[16],并用反卷积计算方法提高了TOF飞行时间法测量原子温度的精确度^[17],试验结果和理论计算表明在原子冷却区利用光学粘胶技术俘获了 6×10^7 左右的铷原子。图6所示为上下两个探测区成像透镜组收集的原子荧光信号,经过弱电流放大(放大倍数 1×10^9 V/A)后产生的电压信号,通过标准荧光探测法计算得出抵达上下探测区原子数目分别为 5.7×10^7 和 1.8×10^7 。

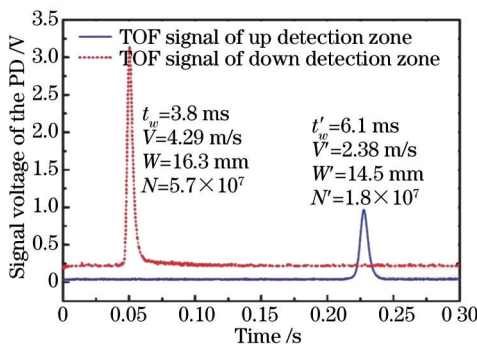


图6 上下探测区原子荧光信号,其中 t_w 为原子穿越时间, V 为原子即时速度, W 是信号的高斯半径, N 为原子数
Fig.6 Measurements of fluorescence signal in the up and down detection zones. t_w is the cross time of atomic cloud through the detection zone, V is the instantaneous velocity of the cloud, W is the Gaussian fitting radius of the signal, and N is the calculated atom number

当微波电磁场与一个二能级原子相互作用时,跃迁几率可以用Rabi精确解描述:

$$P_{12}(t, \omega) = \frac{|2b|^2}{\omega_R^2} \sin^2 \left[\frac{\omega_R(t - t_0)}{2} \right], \quad (1)$$

对于磁偶极跃迁,式中 $|2b| = |-\boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{H}|/\hbar$ 代表原子磁偶极矩和电磁场相互作用, $\boldsymbol{\mu}$ 和 \boldsymbol{H} 分别代表原子磁偶极矩和电磁场磁场强度; $\omega_R = (\Delta\omega^2 + |2b|^2)^{1/2}$ 称为Rabi频率, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 是电磁场频率和原子能级跃迁频率之差。当原子与两个分离场分别相互作用时,假设原子和单个电磁场相互作用时间为 τ ,中间自由飞行时间为 T ,则两次作用以后原子的跃迁几率为:

$$P_{12}(2\tau + T) = 4 \left(\frac{-2b}{\omega_R} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{1}{2} \omega_R \tau \right) \left[\cos \left(\frac{1}{2} \Delta\omega T \right) \cos \left(\frac{1}{2} \omega_R \tau \right) - \frac{\Delta\omega}{\omega_R} \sin \left(\frac{1}{2} \Delta\omega T \right) \sin \left(\frac{1}{2} \omega_R \tau \right) \right]^2, \quad (2)$$

(2)式假定原子团和两个微波作用区相互作用时间相同,而且微波功率保持不变。

然而,在空间钟地面样机运行时,由于原子团在重力场作用下做变速运动,穿越环形腔两个微波作用区所需时间 τ 并不相同,因此会影响原子的真实跃迁几率,为此需要测试原子团和两个微波作用区的Rabi振荡,测试结果见图7。

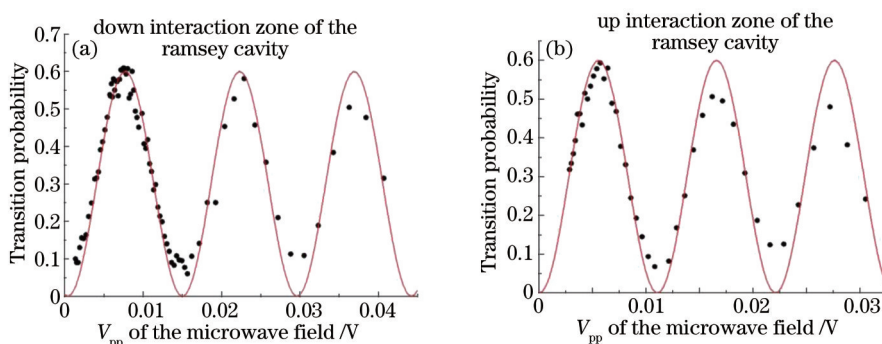


图7 微波环形腔作用区Rabi振荡测试

Fig.7 Rabi oscillation test of the interaction zone of the Ramsey cavity

从测试结果可以看出,当扫描微波功率时,原子跃迁几率最高只有0.6左右,而且最大跃迁几率越来越

小。可能的原因有两个:1) 谐振腔横向微波功率梯度比较大,在大尺寸原子团经过微波腔过程中,原子团中不同位置原子跃迁几率不同;2) 环形腔内部C场均匀度比较差,在原子发生 $3\pi/2$ 或 $5\pi/2$ 跃迁过程中有磁子能级之间的 Majorana 跃迁,导致 $m_f=0$ 的原子发生变化。

当冷原子团以初速度 4.73m/s 上抛,到达环形腔下作用区和上作用区的平均速度分别为 3.8m/s 和 3.1m/s,两次微波作用之间时间间隔为 71ms。如果在原子团穿越微波腔过程中不调节微波场强度,使总的跃迁几率最大,则两次微波作用的跃迁几率将不同。在这样的工作条件下,扫描微波频率得到中心谱线半峰全宽为 7 Hz 的 Ramsey 干涉条纹,如图 8 所示。可以看出图中结果和传统喷泉 Ramsey 干涉条纹中心曲线对比有较大不同,中心跃迁几率峰值虽然最大,但谷底也比较高,原因是两次微波相互作用时原子跃迁几率不同,无法形成彻底的干涉相消的结果。图中获得的干涉条纹为在没有经过选态(归一化)的条件下,单次扫描微波频率所取得的结果,信噪比大约为 70,其中主要的噪声来源于探测系统探测光强噪声和探测电路噪声。

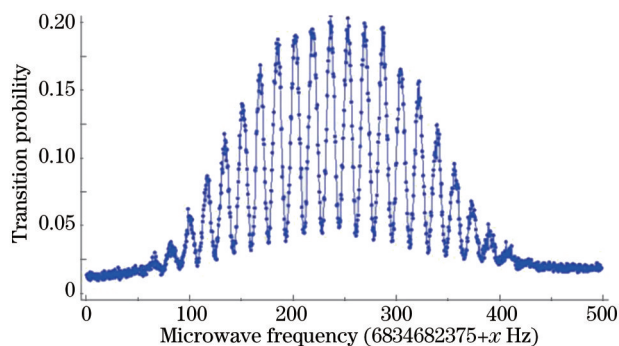


图 8 单次扫描微波频率得到的 Ramsey 干涉条纹,中心峰半峰全宽为 7 Hz

Fig.8 Ramsey fringes in one cycle of the CACS prototype operation, width of the central resonance is 7 Hz.

5 结 论

综上所述,已经完成了空间冷原子钟原理样机物理系统、光学系统、微波系统和自动控制系统的研制,获得了地面原子钟 Ramsey 干涉条纹,实现了空间冷原子钟地面原理样机的科学目标,即验证空间原子钟的基本工作原理,进行科学参数优化和确定工程样机技术指标,同时小型化、集成化、轻量化、工程化方面进行了初步的尝试,为空间冷原子钟工程化积累了研制经验。该样机是目前国内体积最小(150 L)、重量最轻(50 kg)、功耗最小的地面冷原子喷泉钟。目前国际上已实现空间原子钟地面样机的地方只有欧洲空间局(ESA)支持的 PHARAO 铯原子空间钟项目^[4-5],不同于该项目,本课题组选择了铷原子作为工作介质。相对铯原子,在超冷温度下铷原子具有更小的碰撞频移,铷原子钟谐振腔截止波导直径更大、选态过程损失原子数更少,在准确度和稳定度方面都可能超过铯原子。与 PHARAO 钟地面测试结果相比,本课题组的原子钟在原子温度、原子数目、Ramsey 干涉条纹谱线宽度等关键指标上均达到同等水平,但信噪比还有待提高。该样机的全功能实现使得冷原子铷钟登上空间飞行器,为航天工程和科学研究服务成为可能。在此原理样机运行成功的基础上,空间冷原子铷钟工程样机正在研制,在对系统自动化、集成化、小型化、轻量化、力学防震、恒温控制、抗磁场干扰等各方面进行大量的改进之后,有望在不久的将来真正登上航天飞行器,在太空实现首次空间冷原子钟实验。

参 考 文 献

- 1 S Bize, P Laurent, M Abgrall, *et al.*. Advances in atomic fountains[J]. C R Physique, 2004, 5(8): 829-843.
- 2 V Gerginov, N Nemitz, S Weyers, *et al.*. Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CSF2[J]. Metrologia, 2010, 47(1): 65-79.
- 3 Filippo Levi, Davide Calonico, Claudio E Calosso, *et al.*. Accuracy evaluation of ITCsF2: a nitrogen cooled caesium fountain[J]. Metrologia, 2014, 51(3): 270-284.
- 4 Ph Laurent, M Abgrall, Ch Jentsch, *et al.*. Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. Appl Phys B, 2006, 84(4): 683-690.

- 5 Alain Juvigny, Claude Coatantiec, Eric Simon, *et al.*. PHARAO technological and components development for a high performance laser[C]. 55th International Astronautical Congress, 2004: IAC-04-J.1.04.
- 6 N Ashby. PARCS—primary atomic reference clock in space[C]. Proc Second Meeting on CPT and Lorentz Symmetry, 2001: 26.
- 7 C Fertig, K Gibble, B Klipstein, *et al.*. RACE: laser-cooled Rb microgravity clock[C]. Proc 2000 IEEE/EIA Int Freq Contr Symp, 2000: 676 - 679.
- 8 Bian Fenggang, Wei Rong, Jiang Haifeng, *et al.*. A movable-cavity cold atom space clock[J]. Chin Phys Lett, 2005, 22(7): 1645.
- 9 Desheng Lü, Bin Wang, Tang li, *et al.*. Cold atom space clock with counter-propagating atoms[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(8): 735-737.
- 10 Lü Desheng, Liu Liang, Wang Yuzhu. Space cold atomic clock and its science application[J]. Manned Spaceflight, 2011, 1: 47-51.
吕德胜, 刘 亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用[J]. 载人航天, 2011, 1: 47-51.
- 11 Zhou Zichao, Wei Rong, Shi Chunyan, *et al.*. Progress of the ⁸⁷Rb fountain clock[J]. Chin Phys Lett, 2009, 26(12): 123201.
- 12 Xucheng Wang, Huadong Cheng, Ling Xiao, *et al.*. Laser cooling of rubidium 85 atoms in integrating sphere[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(8): 080201.
- 13 Shi Chunyan, Wei Rong, Wang Yuzhu, *et al.*. Working for a mobile high accuracy (10^{-15}) rubidium atomic fountain clock[J]. Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2011, 41(5): 611-619.
- 14 Chunyan Shi, Rong Wei, Zichao Zhou, *et al.*. Magnetic field measurement on ⁸⁷Rb atomic fountain clock[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(6): 549-552.
- 15 Lü Desheng, Qu Qiuzhi, Wang Bin, *et al.*. Miniaturized optical system for atomic fountain clock[J]. Chin Phys B, 2011, 20(6): 063201.
- 16 Wang Bin, Lv Desheng, Qu Qiuzhi, *et al.*. Laser cooling of ⁸⁷Rb atoms to 1.5 μ K in a fountain clock[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(6): 063701.
- 17 Lü Desheng, Qu Qiuzhi, Wang Bin, *et al.*. Improvement on temperature measurement of cold atoms in a rubidium fountain[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(6): 063201.

栏目编辑: 刘丰瑞