

积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法

王秀梅^{1,2}, 李琳¹, 孟艳玲¹, 王亚宁^{1,2}, 于明圆^{1,2}, 王鑫^{1,2},
万金银¹, 肖玲¹, 成华东¹, 刘亮¹

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法。该方法通过周期性地监测冷原子的吸收信号, 利用反馈控制冷却激光内声光调制器的衍射效率并改变冷却光功率, 实现冷原子数的稳定。推导了冷原子数稳定系统的环路方程, 分析了稳定环路对冷原子数涨落的抑制作用。稳定后冷原子数的归一化涨落为 $1 \pm 0.001(3 \text{ h})$, 其功率谱密度在 $0.001 \sim 0.2 \text{ Hz}$ 频率范围内的最大抑制量约为 30 dB 。该涨落被抑制的原因主要是稳定环路除了直接补偿冷却光激光器输出的光功率变化外, 还纠正了外界环境引起的冷原子数漂移。冷原子数稳定之后, 由冷原子数涨落引起的原子钟频率稳定度可降低至 $7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ (τ 为积分时间)。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 积分球; 冷原子数稳定; 冷原子钟

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0802001

New Method for Cold Atom Number Stabilization in Integrating Sphere Cold Atom Clock

Wang Xiumei^{1,2}, Li Lin¹, Meng Yanling¹, Wang Yaning^{1,2}, Yu Mingyuan^{1,2},
Wang Xin^{1,2}, Wan Jinyin¹, Xiao Ling¹, Cheng Huadong¹, Liu Liang¹

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A new method for cold atom number stabilization in a integrating sphere cold atom clock is proposed. The stabilization of cold atom number is realized by periodically monitoring the absorption signal of cold atom, adjusting the diffraction efficiency of acoustic optical modulation in cooling laser, and changing the cooling light power. The loop function of the cold atom number stabilization system is deduced, and its suppression effect on the fluctuation of cold atom number is analyzed. The normalized fluctuation of stabilized cold atom number is 1 ± 0.001 in 3 h, and the maximum suppression of power spectral density is about 30 dB in the range of $0.001\text{-}0.2 \text{ Hz}$. The reason for fluctuation suppression is that the stabilization loop not only compensates the output light power of cooling laser, but also corrects the cold atom number drift induced by environment. When the cold atom number is stable, the atom clock frequency stability induced by the fluctuation of cold atom number is decreased to $7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ (τ is the integral time).

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; integrating sphere; cold atom number stabilization; cold atom clock

OCIS codes 020.3320; 130.3120; 020.1335

1 引言

冷原子源系统在被动型冷原子钟^[1-2]、冷原子干涉仪^[3]、冷原子陀螺仪^[4]等原子频标和精密测量领域中

收稿日期: 2017-03-10; 收到修改稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(11604353)、中国科学院青年创新促进会资助课题

作者简介: 王秀梅(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事激光冷却和原子钟等方面的研究。E-mail: wangxiumei@siom.ac.cn

导师简介: 刘亮(1963-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事冷原子物理、原子钟和原子干涉仪等方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

具有广泛的应用。冷原子数的涨落对这些装置的性能有很大的影响。漫反射激光冷却原子技术^[5-6]相比于磁光阱和光学黏团技术具有光路简单可靠以及无需磁场和全光冷却等优点。积分球冷原子钟是一种使用漫反射激光冷却原理和分离振荡场技术实现高频率稳定度的小型化原子钟。目前国际上只有法国巴黎天文台和中国科学院上海光学精密机械研究所拥有积分球冷原子钟技术。据报道,法国巴黎天文台积分球冷原子钟^[7-8]在积分时间为 2×10^4 s 时的频率稳定度指标最高为 3.2×10^{-15} ^[9]。中国科学院上海光学精密机械研究所利用积分球微波腔一体化技术研制的积分球冷原子铷钟^[10]原理样机在 2×10^4 s 积分时间内的频率稳定度达到了 3.5×10^{-15} ^[11]。积分球冷原子钟在冷原子与微波相互作用后,利用光吸收法探测到的钟信号对本地振荡器的输出频率进行闭环锁定。冷原子数的涨落会直接引起吸收信号的起伏,导致钟信号发生变化,最终影响原子钟的频率稳定度。为了得到稳定的冷原子数,在钟信号进入物理系统之前需先稳定冷却光的功率^[11]。但是,实验发现冷却光在进入物理系统之后仍然存在功率起伏,这是因为功率稳定后的冷却光还需经过多模光纤、透镜以及真空玻璃窗后才能进入物理系统。

本文提出一种积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法。该方法在再抽运光功率饱和的情况下,通过周期性地监测冷原子吸收信号来反馈控制冷却激光内声光调制器(AOM)的衍射效率;通过改变冷却光功率,将冷原子数锁定到参考值上,以实现冷原子数的稳定。该稳定过程类似于间歇式冷原子钟对本地振荡器的频率锁定,均在每个钟周期结束时通过输出误差信号来实施反馈,从而达到闭环锁定的目的。同时,实验中为了减小探测光功率起伏对吸收信号的影响,采取一定的措施来稳定探测光功率^[12]。考虑冷原子数对钟信号信噪比的影响,估算了功率稳定后的冷原子数对原子钟频率稳定度的影响。

2 实验装置与原理

冷原子数稳定系统示意图如图 1 所示。冷却光激光器频率通过饱和吸收模块锁定在 ^{87}Rb D2 线 $5^2\text{S}_{1/2}$, $|F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$, $|F'=1\rangle$ (S 为角量子数为 0 的基态能级符号, P 为角量子数为 1 的激发态能级符号, F 为基态超精细能级结构总角动量量子数, F' 为激发态超精细能级结构总角动量量子数) 和 $5^2\text{S}_{1/2}$, $|F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$, $|F'=3\rangle$ 的交叉峰上,经过双程 AOM 后移频 189 MHz, +1 级衍射光的频率红失谐于 D2 线 $5^2\text{S}_{1/2}$, $|F=2\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$, $|F'=3\rangle$ 22.8 MHz。通过电压控制 AOM 射频驱动器输出信号的频率和功率,调节 +1 级衍射光的频率和功率。再抽运光激光器的频率锁定在 $5^2\text{S}_{1/2}$, $|F=1\rangle \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}$, $|F'=2\rangle$ 上。多个偏振分光棱

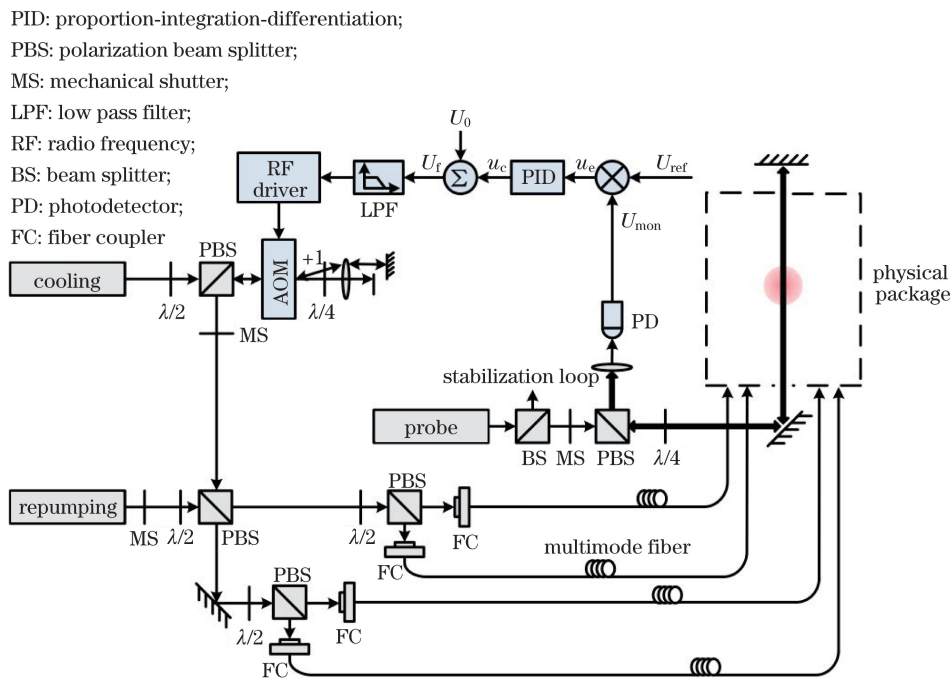


图 1 冷原子数稳定系统示意图
Fig. 1 Schematic of cold atom number stabilization system

镜(PBS)将冷却光和再抽运光均匀地分成4束,再利用多模光纤将这4束光垂直地耦合进物理系统内部,形成漫反射光场,漫反射激光对原子进行冷却并对冷原子团进行操控^[13]。冷却之后的原子分布在 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle$ 上。探测光的频率近共振于 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle \rightarrow 5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$,在进入物理系统之前由分光棱镜(BS)分为两束,一束作为功率稳定的监测光,另一束经透镜组进行扩束,光斑直径增大到约6 mm。扩束后的探测光经过一个光轴与其偏振方向成 45° 的 $1/4$ 波片后变成圆偏振光,圆偏振光进入物理系统后,经固定在上方的 0° 平面反射镜的反射后形成驻波。透射光由光电管(PD)接收、放大,并转化为电压信号。监测和探测到的冷原子数分别记为 N_{mon} 和 N_d ,其中 N_{mon} 对应的吸收信号为 U_{mon} 。

假设 AOM 射频驱动器输出功率的初始工作点电压为 U_0 ,相应的吸收信号为 U_{ref} ,将 U_{ref} 作为冷原子数稳定过程中的参考信号。通过比较监测信号 U_{mon} 与参考信号 U_{ref} ,得到误差信号 u_e 。误差信号 u_e 经比例积分微分(PID)处理后转化为电压信号 u_c 。 u_c 与初始工作点电压 U_0 相加后得到 $U_0 + u_c$ 。信号 $U_0 + u_c$ 作为反馈电压 U_f ,经低通滤波器(LPF)反馈给 AOM 射频驱动器,从而改变射频输出功率。射频输出功率的改变会影响 AOM 的+1级衍射光的衍射效率,改变冷却光功率,从而实现冷却光功率的闭环控制和稳定的冷原子数。

图2所示为冷原子数的稳定时序图,所有时序均由机械开关在光路上进行控制。每个周期($T_c = 88$ ms)包括3个阶段:激光冷却、冷原子数监测和冷原子数探测。激光冷却需要的时间 $T \approx 41.5$ ms。通过比较本周期冷原子数 N_{mon} 的吸收信号与参考值,可得到误差信号,并在本周期结束时反馈控制 AOM 的+1级衍射光的衍射效率,以此改变冷却光功率,监测时长 t_{mon} 通常为1 ms。探测本周期冷原子数 N_d 的吸收信号的时长 t_d 通常也为1 ms。

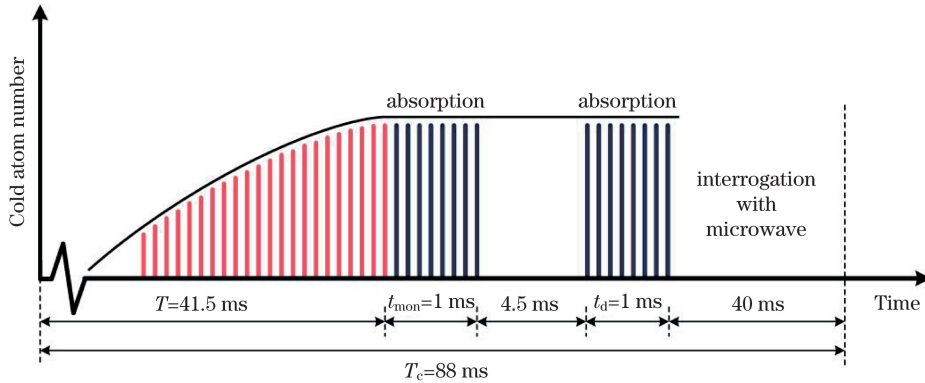


图2 冷原子数稳定时序图

Fig. 2 Stable time sequence of cold atom number

根据图1、2所示的实验装置和时序图可得到简化的冷原子数稳定控制环路模型,如图3所示。首先设置 AOM 射频驱动器的初始工作点电压 U_0 ,使 AOM 工作在线性区域。此时,监测到的冷原子数为

$$N_{\text{mon}} = N_0 + u_y K_{\text{AOM}} K_{\text{cool}}, \quad (1)$$

式中 N_0 为初始工作点电压 U_0 对应的冷原子数, u_y 为工作点电压的变化值, K_{AOM} 为工作点 AOM 的+1级衍射光的衍射效率, K_{cool} 为冷原子数与冷却光功率之间满足的线性关系的线性系数。根据反馈控制原理,稳定后的冷原子数涨落 ΔN_{mon} 可以表示为

$$\Delta N_{\text{mon}} = \frac{1}{1 + K_S \gamma} \Delta N_0 - \frac{1}{(1 + K_S \gamma)} \frac{\Delta U_A \gamma}{K_{\text{PD}}}, \quad (2)$$

式中 $K_S = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c)$ 为时域采样过程中的狄拉克函数, K_L 为环路滤波器增益, K_{PD} 为光电管放大倍数, ΔN_0 为自由运转时冷原子数的涨落, ΔU_A 为光电管噪声, $\gamma = K_{\text{AOM}} K_{\text{cool}} K_{\text{PD}} K_L$ 为环路开环增益。将经 K_S 采样之后的冷原子数涨落记为 ΔN_{mon}^S , $\Delta N_{\text{mon}}^S = \Delta N_{\text{mon}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c)$ 。根据奈奎斯特采样定理,采样过程 K_S 只会将冷原子数的涨落低于 $1/(2T_c) \approx 5.5$ Hz 的频率成分完整地代入控制环路,通过反馈控制进行纠正。图3中1代表开,0代表关。

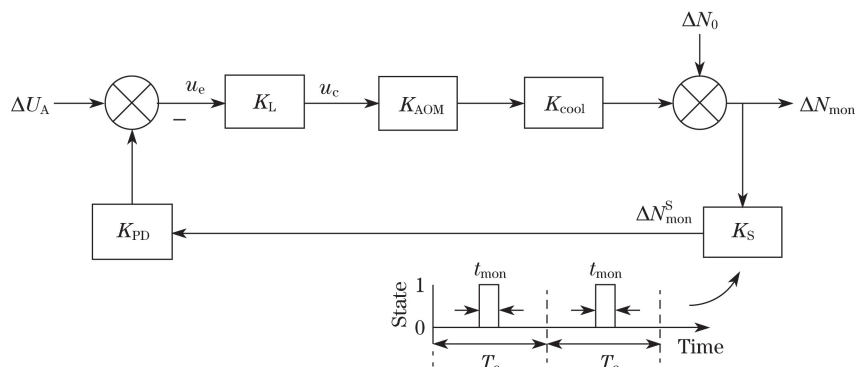


图 3 冷原子数稳定控制系统环路模型

Fig. 3 Loop model of cold atom number stabilization control system

3 实验结果与分析

实验中,探测光经过冷原子吸收后被硅光电管(型号 2001-FS-M, Newport 公司,美国)接收并放大,最终转换成电压信号,该光电管的放大倍数为 $3.25 \times 10^2 \text{ V} \cdot \text{mW}^{-1}$,对接收到的信号进行低通滤波,滤波带宽为 320 Hz.由于探测光的功率起伏会直接耦合到冷原子的吸收信号中,实验中为了减小探测光功率起伏对吸收信号的影响,在探测光进入物理系统之前,对探测光进行了功率稳定,经过稳定后的探测光功率起伏得到有效抑制.同时,为了避免环境因素对探测光光路和冷原子数的影响,整个物理系统被放置于一个恒温箱内.在获取冷原子数的过程中,为了减小 LabVIEW 采集板卡对信号的影响,分别将监测时间 t_{mon} 和探测时间 t_d 内冷原子吸收信号的平均值作为冷原子的吸收信号.通过吸收信号可分别计算监测到的冷原子数 N_{mon} 和探测到的冷原子数 N_d ^[14].将探测到的冷原子数 N_d 的平均值记为 \bar{N}_d ,定义 $\eta = N_d / \bar{N}_d$ 为归一化 \bar{N}_d 的冷原子数涨落.

利用弱光($I/I_{\text{sat}} = 0.4\%$, I_{sat} 为饱和光强, I 为测得的光强)对冷原子进行吸收探测,探测光功率 P 约为 $1.8 \mu\text{W}$.图 4 所示为归一化探测光功率在 3 h 内的起伏.可以看出,归一化探测光功率峰峰起伏 $P/\bar{P} = 1 \pm 0.00015$ (\bar{P} 为平均功率),其标准方差 $\sigma_{P/\bar{P}} = 4 \times 10^{-5}$.归一化探测光功率的峰峰起伏主要来源于光电管本身的噪声和探测光功率的起伏.光电管的低频噪声及电阻热噪声等均会引起信号的起伏,而探测光功率的起伏主要来源于光路和功率稳定环路内的电压基准源,其中电压基准源的长期起伏受温度波动和器件老化等环境因素的影响.

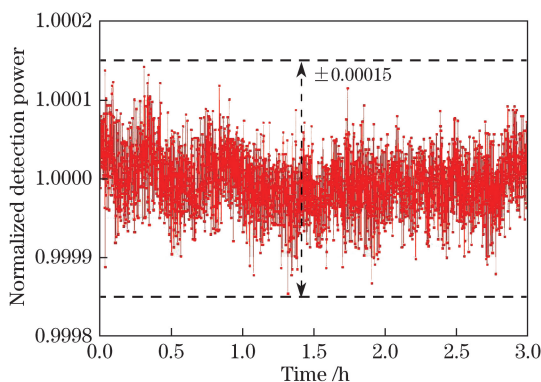


图 4 归一化探测光功率在 3 h 内的起伏

Fig. 4 Fluctuation of normalized detection power in 3 h

图 5 为 3 h 内冷原子数稳定前后的归一化冷原子数涨落 η ,蓝色三角线和红色圆形线分别表示稳定前后的冷原子数涨落,将稳定前和稳定后冷原子数的涨落分别记为 η_a 和 η_b .稳定前峰峰值涨落 $\eta_a = 1 \pm 0.006$,冷原子数发生漂移,标准方差 $\sigma_{\eta_a} = 2.5 \times 10^{-3}$.冷原子数稳定后,峰峰值涨落减小, $\eta_b = 1 \pm 0.001$,标准方差提高约一个数量级, $\sigma_{\eta_b} = 2.6 \times 10^{-4}$.此外,对比图 4、5 可以看出,稳定后的冷原子数涨落和探测光功

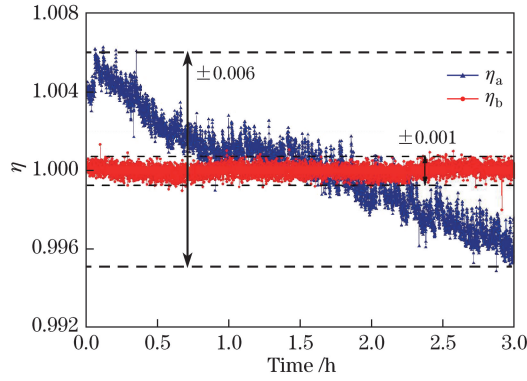


图 5 3 h 内冷原子数稳定前后归一化的冷原子数涨落

Fig. 5 Normalized cold atom number fluctuation in 3 h before and after stabilization

率起伏之间相差约一个数量级,所以在监测和探测冷原子数吸收信号的过程中可以忽略探测光功率起伏的影响。

对图 5 中稳定前和稳定后的冷原子数分别进行快速傅里叶变换,得到稳定前的涨落 η_a 的噪声谱密度 $S_y^a(f)$ 和稳定后的涨落 η_b 的噪声谱密度 $S_y^b(f)$ 。冷原子数涨落的功率谱密度(PSD)如图 6 所示,图中蓝色三角线和红色圆形线分别表示稳定前后的冷原子数涨落的 PSD。在频率为 0.001~0.2 Hz 范围内,涨落的最大抑制量约为 30 dB。该涨落被抑制的原因主要是:稳定环路除了直接补偿冷却光激光器输出的光功率变化外,还纠正了外界环境引起的冷原子数漂移。引起冷原子数漂移的主要因素包括:AOM 射频驱动器受温度变化和电压波动的影响,4 根多模光纤受温度变化和震动的干扰以及光学元器件的影响等。环路的反馈在约 0.3 Hz 频率处引起一个尖峰,该现象可能是由稳定过程中将前若干次循环的误差信号求和作为反馈积分项引起的,而高于 0.3 Hz 的涨落可被积分项滤除。在 1~5 Hz 范围内,稳定后噪声谱密度与稳定前基本一致。

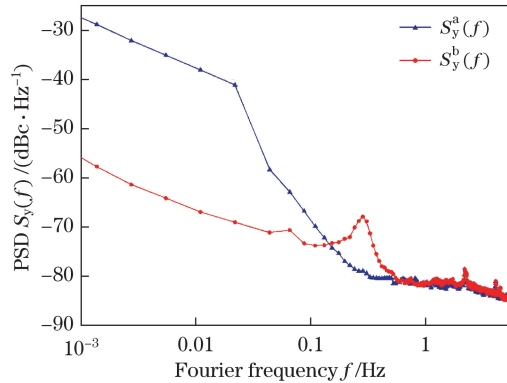


图 6 冷原子数涨落的 PSD

Fig. 6 PSD of cold atom number fluctuation

降低冷原子数涨落对提高原子钟的频率稳定度具有重要意义。在原子钟闭环锁定过程中,以冷原子数的吸收信号作为钟信号,积分球中冷原子的光学厚度约为 0.18。在一阶近似下,可认为吸收信号与探测到的冷原子数成正比。冷原子数的涨落会直接影响钟信号的信噪比,限制原子钟的频率稳定度。信噪比 R_{sn} 可以表示为 $R_{sn} = \overline{N}_d / \sigma_{N_d} = 1 / \sigma_\eta$,由冷原子数涨落引起的稳定度可以记为

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{C} \frac{1}{Q_a} \sigma_\eta \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}, \quad (3)$$

式中 C 为对比度; Q_a 为原子的品质因数, $Q_a = 3.4 \times 10^8$; τ 为积分时间。在上述对图 5 的讨论中,稳定后的冷原子数的 R_{sn} 由稳定前的 4×10^2 提高至 3.8×10^3 ,提高约一个数量级,由冷原子数涨落引起的原子钟频率稳定度降低至 $7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。

4 结 论

提出了一种积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法。采用冷却激光中的 AOM 作为执行器,在每个周期的激光冷却结束时,通过比较监测到的信号和参考信号,得到误差信号;在周期结束时反馈控制 AOM 的衍射效率,改变冷却光功率,实现冷原子数的稳定。给出了冷原子数稳定系统的环路方程,分析了环路对冷原子数涨落的抑制作用。傅里叶频率在 $0.001\sim 0.2$ Hz 范围内,冷原子数涨落得到有效抑制,约为 30 dB。稳定后的冷原子数涨落为 $1\pm 0.001(3\text{ h})$,其标准方差降低至 2.6×10^{-4} ,对积分球冷原子钟频率稳定度的限制为 $7\times 10^{-14}\tau^{-1/2}$ 。

参 考 文 献

- [1] Peil S, Crane S, Hanssen J, *et al.* Measurements with multiple operational fountain clocks[C]. Joint Conference on Frequency Control and the European Frequency and Time Forum, 2011: 12178149.
- [2] Esnault F X, Holleville D, Rossetto N, *et al.* High-stability compact atomic clock based on isotropic laser cooling[J]. Physical Review A, 2010, 82(3): 033436.
- [3] Biedermann G W, Wu X, Deslauriers L, *et al.* Testing gravity with cold-atom interferometers[J]. Physical Review A, 2015, 91(3): 033629.
- [4] Gilowski M, Schubert C, Wendrich T, *et al.* High resolution rotation sensor based on cold rubidium atoms[C]. IEEE International Conference on Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time forum, 2009: 10790794.
- [5] Cheng H D, Zhang W Z, Ma H Y, *et al.* Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light[J]. Physical Review A, 2009, 79(2): 023407.
- [6] Guillot E, Pottie P E, Dimarcq N. Three-dimensional cooling of cesium atoms in a reflecting copper cylinder[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1639-1641.
- [7] Esnault F X, Perrin S, Tremine S, *et al.* New design of the compact cold atoms clock HORACE[C]. 20th European Conference on Frequency and Time Forum, 2006: 12849440.
- [8] Tremine S, Guerlandel S, Holleville D, *et al.* Development of a compact cold atom clock[C]. IEEE International Conference on Frequency Control Symposium and Exposition, 2004: 8563965.
- [9] Esnault F X, Rossetto N, Holleville D, *et al.* HORACE: A compact cold atom clock for Galileo[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5): 854-858.
- [10] Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 062101.
- [11] Liu P, Cheng H D, Meng Y L, *et al.* Improvement in medium-long term frequency stability of integrating sphere cold atom clock[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(7): 1439-1441.
- [12] Li Lin, Liu Peng, Ji Jingwei, *et al.* Probe laser power stabilization for integrated sphere cold atom clock[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814004.
李 琳, 刘 鹏, 吉经纬, 等. 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814004.
- [13] Meng Y L, Cheng H D, Zheng B C, *et al.* Controlling the shape of a cold atom cloud in a cylindrical cavity[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(6): 063701.
- [14] McDonald G D. Detecting atomic shot noise on ultracold atom clouds[D]. Canberra: Australian National University, 2009: 12-14.