

积分球冷原子钟相位调制 Ramsey 条纹研究

刘 鹏^{1,2} 成华东^{1*} 孟艳玲¹ 万金银¹ 王秀梅^{1,2} 王亚宁^{1,2} 肖 玲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 在进行 Ramsey 作用时,以 $\pm\pi/2$ 的相位差来调制同一频率点处两个周期微波脉冲,可以获得中心频率幅值为零的 Ramsey 条纹。这种方法可以直接通过中心频率处原子对探测光的吸收值变化来产生反馈本地振荡器的误差信号。理论上,相比于同相位 Ramsey 条纹,这种方法可以使得条纹信号幅值增加一倍。实验上,在积分球冷原子钟系统上,获得的相位调制 Ramsey 线型与理论计算相同,而且 Ramsey 条纹振荡幅值达到同相位下的 1.6 倍。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 积分球; 原子钟; 冷原子; 相位调制

中图分类号 O431.2; TN629.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1112001

Research on Phase Modulation of Ramsey Fringes in Integrating Sphere Cold Atom Clocks

Liu Peng^{1,2} Cheng Huadong¹ Meng Yanling¹ Wan Jinyin¹ Wang Xiumei^{1,2}
Wang Yaning^{1,2} Xiao Ling¹ 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 In the Ramsey scheme, if one modulates two microwave pulses at the same frequency but with $\pm\pi/2$ phase differences, the Ramsey fringes with zero amplitude at the central frequency can be obtained. By monitoring the variance of probe light absorption by atoms at the central frequency, one can get the error signals which feedbacks to the local oscillator. Theoretically, this method doubles the absorption signal intensity, compared with the case of Ramsey fringes with the same phase. Experimentally, the phase modulated Ramsey pattern in the integrating sphere cold atom clock system is the same with that from theoretical calculation. Moreover, the Ramsey fringe oscillation amplitude here is 1.6 times of that of Ramsey fringes with the same phase.

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; integrating sphere; atomic clock; cold atom; phase modulation

OCIS codes 020.3320; 350.4010; 020.1335

1 引 言

积分球冷原子钟是一种基于漫反射激光冷却原子^[1]、利用分离场振荡技术^[2]来获得高稳定度钟信号的小型化原子钟。相比于基于磁光阱(MOT)和光学黏团技术的原子钟,积分球冷原子钟具有光路简单可靠、

收稿日期: 2016-04-12; **收到修改稿日期:** 2016-05-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA120702)

作者简介: 刘 鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事激光冷却与小型化冷原子钟方面的研究。

E-mail: lpeng@siom.ac.cn

导师简介: 刘 亮(1963—),男,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。chenghd@siom.ac.cn

无需磁场控制和全光冷却的优点。法国巴黎天文台基于各向同性光场冷却原理设计的铯原子钟 (HORACE)^[3-4] 达到了短期稳定度为 2.2×10^{-13} 、1 万秒积分时间内稳定度为 3×10^{-15} 的水平, 实现了商业化的应用^[5]。2008 年上海光学精密机械研究所的积分球小组利用陶瓷积分球首次实现了漫反射激光冷却铷原子^[6], 后来又实现了积分球冷原子钟的闭环运行^[7]。

Ramsey 提出的分离振荡法是利用两个 $\pi/2$ 微波脉冲先后作用于原子系统, 得到压窄后的跃迁谱线, 使原子钟真正得以实用。一台原子钟的 Ramsey 条纹的信噪比和对比度直接决定了短期稳定度极限。文献^[8]提出利用前向散射光来探测每个周期参与钟跃迁的原子数, 消除了背景光强的影响, 使 Ramsey 条纹对比度达到 90% 以上。这种偏振探测的方法使脉冲抽运式原子钟的短期稳定度达到 2.0×10^{-12} 。

在通常情况下, 分离振荡法使用的两个微波脉冲相位相同。当两个脉冲之间存在固定的相位差时, 探测到的 Ramsey 条纹形状会随着相位差的改变而改变^[2]。当同一频率点处两次 Ramsey 过程的微波相位差分别为 $\pm\pi/2$ 时, 将两次的探测信号幅值相减可以得到中心频率处原子对探测光的吸收值为零的 Ramsey 条纹。理论上, 采用这种方法得到的 Ramsey 条纹振荡幅值为同相位 Ramsey 条纹的两倍。对于利用 Ramsey 条纹作为鉴频信号的原子钟而言, 这种特性可以使鉴频灵敏度提高一倍, 原子钟的短期稳定度得到提高。

2 原 理

对于二能级结构原子, 当不考虑原子速度分布时, 经过两个微波脉冲同相位的 Ramsey 作用后, 原子向上能级的跃迁概率为^[2]

$$P(2\tau + T) = 4 \sin^2\left(\frac{\Omega}{\Omega'}\right) \sin^2\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\delta T}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) - \frac{\delta}{\Omega'} \sin\left(\frac{\delta T}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) \right]^2, \quad (1)$$

式中 τ 为 $\pi/2$ 脉冲作用时间, T 为自由演化时间, δ 为微波失谐频率, Ω 为拉比频率, $\Omega' = \sqrt{\Omega^2 + \delta^2}$ 。当两个微波脉冲存在相位差 φ 时, 原子向上能级的跃迁概率为^[2]

$$P_\varphi(2\tau + T) = 4 \sin^2\left(\frac{\Omega}{\Omega'}\right) \sin^2\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\delta T - \varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) - \frac{\delta}{\Omega'} \sin\left(\frac{\delta T - \varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega'\tau}{2}\right) \right]^2. \quad (2)$$

当 $\varphi = \pm\pi/2$ 时, 将同一频率处两次 Ramsey 作用后的吸收值相减, 可得到中心频率处吸收值为零、振幅为同相位 Ramsey 条纹两倍的振荡条纹。同相位与相位调制 Ramsey 条纹的理论计算结果如图 1 所示, 其中 $T = 20 \text{ ms}$, $\tau = 1.5 \text{ ms}$ 。可以看出, 相位调制后的 Ramsey 振荡幅值是同相位振荡的两倍, 且中心频率处幅值为零。因此可以利用中心频率处的吸收值变化作为鉴频信号来锁定本地振荡器。跳频探测是利用两个周期 Ramsey 中心条纹半峰全宽处信号大小得到误差信号, 相比于该方法, 相位调制单频探测闭环方法使反馈灵敏度提高了一倍。如图 1 所示, 相位调制 Ramsey 条纹在中心频率处的斜率约为 $0.14/\text{Hz}$, 拟合同相位 Ramsey 条纹在半峰全宽位置处的斜率约为 $0.07/\text{Hz}$ 。

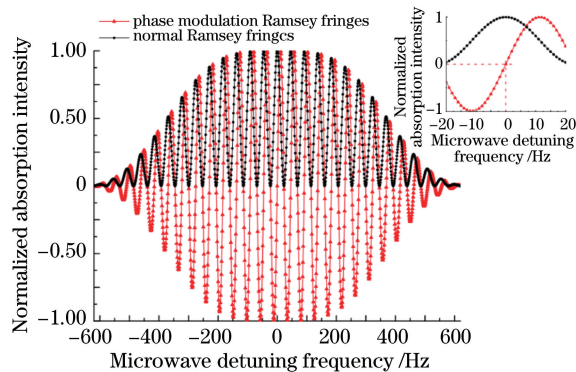


图 1 理论计算得到的同相位与相位调制 Ramsey 条纹

Fig. 1 Theoretically obtained Ramsey fringes with same phase and phase modulation

3 实验与讨论

相位调制 Ramsey 条纹实验是在一体化的柱形微波腔积分球冷原子钟系统上进行的。系统结构如图 2 所示,其中 PBS 为偏振分光棱镜,QWP 为四分之一波片。微波腔内表面经过喷砂处理,以该内表面作为漫反射面(780 nm 漫反射率为 96%)进行各向同性激光冷却,同时在微波腔内使原子产生钟跃迁^[9]。设计微波腔的直径与高度均为 57 mm,由两台离子泵维持系统内部真空。柱形微波腔工作在 TE_{011} 模式上,共振频率调节在 6.834 GHz 处。偏置磁场缠绕在微波腔外的铝筒上,大小为 12 mG。整个物理系统由 5 层磁屏蔽包裹,冷却光、抽运光和再抽运光耦合进四路多模光纤,经微波腔底面对称分布的四个通光孔注入腔内。经过扩束后探测光从底部竖直向上注入积分球内,并由物理系统上部水平放置的平面反射镜反射回来,形成驻波探测结构,由底部低噪声光电管探测冷原子吸收信号。

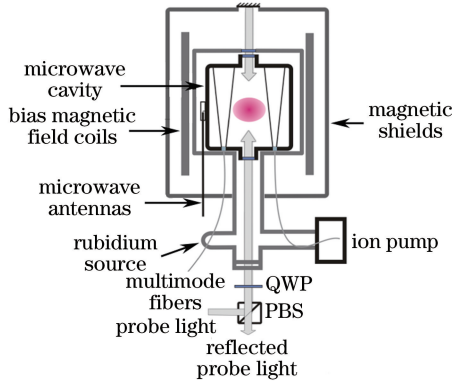


图 2 积分球冷原子钟物理系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of physical system of integrating sphere cold atom clock

首先是 55 ms 的漫反射激光冷却过程,使用功率为 170 mW、红失谐于 $Rb^{87} D_2$ 线 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle$ 到 $5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$ 跃迁(F, F' 为原子总角动量量子数)的冷却光和功率为 9 mW、近共振于 $5^2S_{1/2}, |F=1\rangle$ 到 $5^2P_{3/2}, |F'=2\rangle$ 跃迁的重抽运光将原子冷却到温度小于 100 μK 。其次是利用脉宽为 0.5 ms、功率为 200 μW 的抽运光将 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle$ 上的原子抽运到 $5^2S_{1/2}, |F=1\rangle$ 态上。接着是时长为 23 ms 的 Ramsey 作用:两个调谐到 $5^2S_{1/2}, |F=1, m_F=0\rangle$ 到 $5^2S_{1/2}, |F=2, m_F=0\rangle$ 的 $\pi/2$ 微波脉冲(m_F 为磁子能级)作用在冷原子上($\tau=1.5$ ms, $T=20$ ms)。最后利用功率约为 2 μW 、近共振于 $5^2S_{1/2}, |F=2\rangle$ 到 $5^2P_{3/2}, |F'=3\rangle$ 跃迁的探测光探测得到原子吸收信号。实验中各跃迁能级如图 3 所示,其中 ω_0 为基态钟频跃迁角频率, Φ 为 Ramsey 微波脉冲相位。

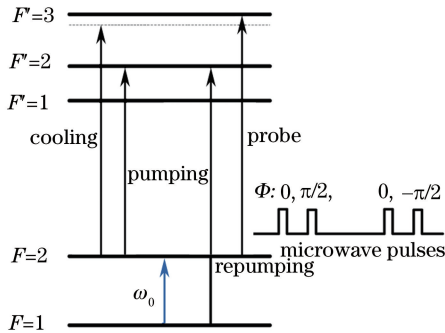


图 3 $Rb^{87} D_2$ 线能级示意图

Fig. 3 Schematic diagram of atomic levels of $Rb^{87} D_2$ line

利用 Labview 程序控制信号发生器以实现扫频、相位变化的功能。设定扫频过程中每个频率点运行两个周期,其中一个周期内两个微波脉冲之间的相位差为 $\pi/2$,另一个周期内两个微波脉冲之间的相位差为 $-\pi/2$ 。微波时序如图 3 所示。以两个周期吸收值之差作为该频点的 Ramsey 信号值,在中心频率附近 2000 Hz 宽度内扫频得到图 4 所示的相位调制 Ramsey 条纹信号。由图 4 可以看到,同相位与相位调制

Ramsey 条纹线宽相同,红色曲线振荡幅值约为黑色曲线的 1.6 倍。图 4 右上角为 Ramsey 中心条纹,宽度为 40 Hz。可见失谐量 0.69 Hz 处为中心频率区域相位调制 Ramsey 条纹信号幅值为零处。

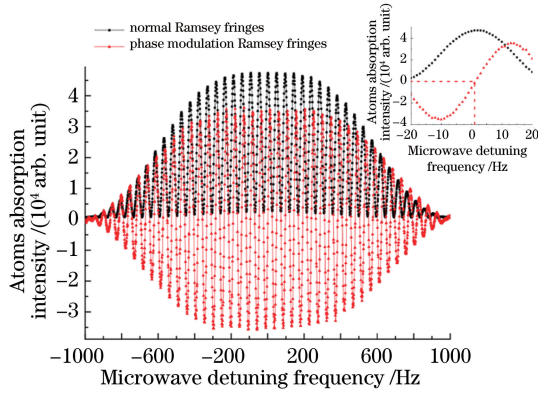


图 4 实验得到的同相位与相位调制 Ramsey 条纹

Fig. 4 Experimentally obtained Ramsey fringes with same phase and phase modulation

在原子钟闭环锁定时,利用这种方法可以将参考本地振荡器输出的微波频率固定在原子钟跃迁中心频率附近吸收值为零的频点处。通过测量每个周期该点吸收值的变化得到负反馈的误差信号。Ramsey 中心条纹在锁定点的斜率直接决定了鉴频信号的灵敏度。由于相位调制不会使 Ramsey 中心条纹的线宽增大,因此鉴频信号的灵敏度随着振荡幅值提高到原来的 1.6 倍。需要说明的是,虽然在某一频率点处相位调制 Ramsey 条纹需要两个钟周期的测量,但是当闭环运行时,只需将两个周期的差值与零点比较即可,因此这种方式没有增加反馈周期内的死时间,Dick 效应的影响没有因此而变大。当脉冲的作用时间增加至 3 ms、总周期为 145 ms 时,得到了信噪比较高的相位调制 Ramsey 条纹,如图 5 所示。由图可以发现,相位调制 Ramsey 条纹的幅值未达到理论值(同相位 Ramsey 条纹的两倍),且谱线噪声较大,这可能是由于实验中信号发生器每个周期的微波脉冲相移大小并非精准的 $\pm\pi/2$,同时也与微波源的相噪水平、冷原子数有关。

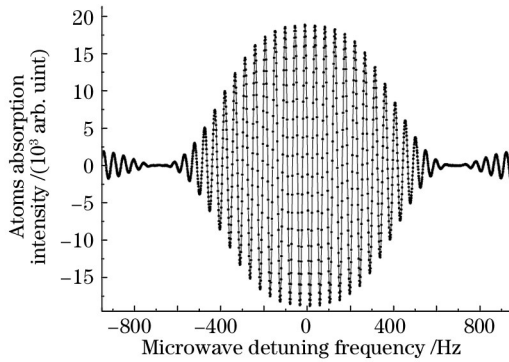


图 5 相位调制 Ramsey 条纹 ($\tau=3$ ms, $T=0.145$ s)

Fig. 5 Ramsey fringes with phase modulation ($\tau=3$ ms, $T=0.145$ s)

4 结 论

利用分离振荡法和积分球冷原子钟物理系统,得到了具有特定相位差的两个 Ramsey 条纹,实验结果与理论相符,条纹中心频率处原子对探测光的吸收值在零附近,且信号值为同相位 Ramsey 条纹的 1.6 倍。采用这种方法获得的冷原子钟闭环锁定的鉴频曲线灵敏度也相应提高到原来的 1.6 倍。在同等条件下,该方法可以使原子钟仅依靠微波注入方式的改变就可以得到信噪比更高的 Ramsey 条纹,同时短期稳定度更好。

致谢 感谢林锦达有益的讨论与帮助。

参 考 文 献

- 1 Ketterle W, Martin A, Joffe M A, *et al.* Slowing and cooling atoms in isotropic laser light[J]. Physical Review Letters, 1992, 69(17): 2483-2486.
- 2 Ramsey N F. Molecular beams[M]. New York: Oxford University Press, 1955: 115-134.
- 3 Esnault F X, Perrin S, Tremine S, *et al.* New design of the compact cold atoms clock HORACE[C]. Frequency and Time Forum (EFTF), 2006: 237-240.
- 4 Tremine S, Guerandel S, Holleville D, *et al.* Development of a compact cold atom clock[C]. Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2004: 65-70.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Lin J D, Deng J L, Ma Y S, *et al.* Detection of ultra-high resonance contrast in vapor cell atomic clocks[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5036-5038.
- 9 Meng Yanling, Gao Yuanci, Zheng Benchang, *et al.* Design for the integration of integrating sphere and microwave cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0918001.
孟艳玲, 高源慈, 郑本昌, 等. 积分球与微波腔一体化装置的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0918001.