



利用钟跃迁谱线测量超稳光学参考腔的零温漂点

李婷 卢晓同 周驰华 尹默娟 王叶兵 常宏

Zero-crossing temperature of ultra-stable optical reference cavity measured by optical transition spectrum

Li Ting Lu Xiao-Tong Zhou Chi-Hua Yin Mo-Juan Wang Ye-Bing Chang Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 073701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201721

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201721>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度光学参考腔的自主化研制

Self-reliance and independently developed high-finesse spherical ultrastable optical reference cavity

物理学报. 2017, 66(8): 080601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.080601>

铯原子光晶格钟自旋极化谱线的探测

Interrogation of spin polarized clock transition in strontium optical lattice clock

物理学报. 2018, 67(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172759>

利用传输腔技术实现镱原子光钟光晶格场的频率稳定

Transfer cavity scheme for stabilization of lattice laser in ytterbium lattice clock

物理学报. 2017, 66(16): 164205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.164205>

超稳光生微波源研究进展

Progresses of ultrastable optical-cavity-based microwave source

物理学报. 2018, 67(16): 160602 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180751>

铯原子光晶格钟碰撞频移的测量

Measurement of collision frequency shift in strontium optical lattice clock

物理学报. 2019, 68(23): 233401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191147>

绝热跃迁方法测量铯喷泉钟冷原子碰撞频移

Investigation of cold atom collision frequency shift measured by rapid adiabatic passage in cesium fountain clock

物理学报. 2020, 69(14): 140601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191800>

利用钟跃迁谱线测量超稳光学参考腔的零温漂点*

李婷¹⁾²⁾ 卢晓同¹⁾²⁾ 周驰华¹⁾²⁾ 尹默娟¹⁾ 王叶兵^{1)†} 常宏^{1)2)‡}

1) (中国科学院国家授时中心, 中科院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2020年10月16日收到; 2020年12月3日收到修改稿)

在⁸⁷Sr光晶格钟实验系统中, 通过将自由运转的698 nm激光频率锁定在由超低膨胀系数的玻璃材料构成的超稳光学参考腔上, 从而获得短期频率稳定性较好的超稳窄线宽激光. 超稳光学参考腔的腔长稳定性决定了最终激光频率的稳定度. 为了降低腔长对温度的敏感性, 使激光频率具有更好的稳定性和更小的频率漂移, 利用铯原子光晶格钟的钟跃迁谱线, 测量了698 nm超稳窄线宽激光系统中超稳光学参考腔的零温漂点. 通过对钟跃迁谱线中心频率随温度的变化曲线进行二阶多项式拟合, 得到698 nm超稳窄线宽激光系统的零温漂点为30.63 °C. 利用铯原子光晶格钟的闭环锁定, 测得零温漂点处698 nm超稳窄线宽激光系统的线性频率漂移率为0.15 Hz/s, 频率不稳定性为 1.6×10^{-15} @3.744 s.

关键词: 超稳光学参考腔, 频率漂移, 钟跃迁谱线, 零温漂点

PACS: 37.10.Jk, 42.62.Fi, 32.70.Jz

DOI: 10.7498/aps.70.20201721

1 引言

通常原子钟由量子参考体系、本地振荡器和锁定系统三部分构成. 对于最可能成为新一代的基准原子钟——光钟, 本地振荡器是超稳窄线宽激光系统^[1]. 在超稳窄线宽激光系统中, 由超低膨胀系数(ULE)的玻璃材料构成的高精细度超稳光学参考腔(ULE腔), 为超稳窄线宽激光的实现提供了一个稳定的频率基准. 锁定于ULE腔的超稳窄线宽激光具有优异的短期频率稳定性和极低的频率噪声. 除此之外, 超稳窄线宽激光系统在物理基本常数的测量^[2-4]、暗物质的寻找^[5-8]和引力波的探测^[9,10]等方面也有广泛的应用.

ULE腔通常由掺杂二氧化钛的玻璃材料和两个高反射的熔融石英镜组成, 其腔长容易受到温度

变化、机械振动和气流等因素的影响^[11,12]. ULE腔腔长的稳定性决定了最终激光频率能够达到的稳定度. 在室温附近, ULE材料存在一个使其热膨胀系数为零的特殊温度点, 称为零温漂点^[13]. 在零温漂点处, ULE腔的腔长对温度的变化非常不敏感^[14], 并且ULE腔的长度为最小值^[15]. 因此, 为了降低ULE腔腔长对温度的敏感性, 使激光频率具有更好的稳定性和更小的漂移, 测量ULE腔的零温漂点尤为重要.

测量ULE腔的零温漂点的方法通常有以下几种: 第一种方法是使用锁定于高精度频率基准的光学频率梳, 通过测量不同温度下锁定于ULE腔的激光器的绝对频率, 得到ULE腔的零温漂点. 例如, 2018年中国科学院武汉物理与数学研究所利用该方法测得ULE腔的零温漂点, 测量误差为3 °C^[13]. 第二种方法是使用稳定性更高的ULE腔作为参

* 国家自然科学基金(批准号: 11803042, 61775220)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFF0200201)、中国科学院前沿科学重点研究项目(批准号: QYZDB-SSW-JSC004)和中国科学院青年创新促进会(批准号: 2019400)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyebing@ntsc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

考, 通过测量 ULE 腔共振频率随温度的变化, 得到 ULE 腔的零温漂点. 例如, 2011 年美国国家标准与技术研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 利用该方法测得 ULE 腔的零温漂点, 测量误差为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ^[12]. 第三种方法是利用原子的钟跃迁谱或者饱和吸收谱作为参考, 通过测量不同温度下 ULE 腔共振频率, 得到 ULE 腔的零温漂点. 例如, 2018 年中国科学院武汉物理与数学研究所利用原子的钟跃迁谱测得 ULE 腔的零温漂点, 其量误差为 $0.36\text{ }^\circ\text{C}$ ^[13]; 2019 年山西大学利用原子的饱和吸收谱测得 ULE 腔的零温漂点, 测量误差为 $0.22\text{ }^\circ\text{C}$ ^[16]. 原子的钟跃迁谱相比于饱和吸收谱, 其谱线线宽更窄, 更适用于测量超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的零温漂点. 在铯原子光晶格钟实验中, 通过扫描声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 的频率, 得到原子的钟跃迁谱线, 然后根据不同温度下钟跃迁谱线的中心频率得到 ULE 腔的共振频率, 从而得到 ULE 腔的零温漂点^[13]. 这三种方法相比较而言, 由于实验条件的限制, 以原子的钟跃迁谱线来测量超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的零温漂点, 测量精度更高、实验操作更方便.

2 实验装置及原理

2.1 理论分析

在零温漂点处, ULE 腔的腔长随温度波动的变化率具有最小值, 锁定到 ULE 腔的超稳窄线宽激光具有最小的频率漂移率^[12]. ULE 腔的温度及其波动会引起腔长的变化, ULE 腔的长度与温度变化关系^[17,18]为

$$\Delta L/L_0 = \frac{1}{2}\alpha(T - T_0)^2 + \frac{1}{3}\beta(T - T_0)^3, \quad (1)$$

其中, ΔL 为腔长变化量, L_0 为 ULE 腔的腔长, α 为有效热膨胀系数的线性温度系数, 其单位为 ppb/ K^2 , β 为二阶温度系数, T 为实际温度, T_0 为有效零温漂点. 在一阶近似下, ULE 腔的长度变化量与温度的关系可表示为

$$\Delta L = \frac{1}{2}L_0\alpha(T - T_0)^2. \quad (2)$$

由于腔长变化量很小, 实验中不易测量, 所以通常转化为测量其共振频率的变化量^[19]. ULE 腔的腔长与共振频率的关系为

$$-\Delta L/L_0 = \Delta\nu/\nu_0, \quad (3)$$

其中, ν_0 为共振频率, $\Delta\nu$ 为共振频率变化量. 则 ULE 腔的共振频率变化量与温度之间的变化关系为:

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2}\alpha\nu_0(T - T_0)^2. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, ULE 腔的共振频率与温度是二次方的关系, 通过二项式拟合 ULE 腔共振频率随温度的变化关系, 可知 ULE 腔共振频率变化率最小值所对应的温度即为零温漂点.

2.2 实验装置

在 ^{87}Sr 光晶格钟实验系统中, 利用铯原子 ($5s^2$) $^1\text{S}_0$ —($5s5p$) $^3\text{P}_0$ 能级跃迁作为参考, 超稳窄线宽激光作为本地振荡器, 通过测量铯原子的跃迁几率得到频率的误差信号, 把超稳窄线宽激光系统的频率锁定到铯原子的钟跃迁谱线上, 从而实现 ^{87}Sr 光晶格钟的闭环锁定. 量子参考体系的制备一般分为一级冷却、二级冷却以及光晶格装载. 经过一级冷却后, 获得的冷原子数目在 10^7 量级、温度为 5 mK . 为了进一步降低冷原子的温度, 进行二级冷却. 二级冷却结束后, 获得冷原子的数目在 10^6 量级、温度为 $3.9\text{ }\mu\text{K}$. 利用波长为 813.42 nm (即“魔数波长”)、束腰为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 、光功率为 300 mW 的晶格光, 将冷原子囚禁在由其驻波光场形成的周期势阱 (光晶格) 中^[20]. 最终装载进光晶格中的冷原子数目在 10^4 量级、温度约为 $3.0\text{ }\mu\text{K}$ ^[21].

实验中使用的超稳窄线宽激光器是输出波长为 698 nm 的半导体激光器, 对应铯原子 ($5s^2$) $^1\text{S}_0$ —($5s5p$) $^3\text{P}_0$ 能级跃迁. 其 ULE 腔的腔长为 10 cm , 精细度为 400000 . 为了减小外界环境的影响, 将 ULE 腔安装在高真空圆柱形腔体中, 并且在高真空腔体的外表面配有温度控制器, 再将高真空腔体安装在有保温隔层的金属腔中, 将整个金属腔放置在隔震平台上并封闭在隔音箱中^[22]. 通过温度控制器调节高真空腔体外表面的温度, 从而实现调节和控制 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的温度, 其控制精度为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$. 通过 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术^[23] 将 698 nm 超稳窄线宽激光频率锁定到 ULE 腔的共振频率上, 在压窄 698 nm 超稳窄线宽激光线宽的同时完成频率锁定, 获得超稳窄线宽激光的线宽在 1 Hz 左右, 从而能够实现 698 nm 超稳窄线宽激光的稳定输出^[24].

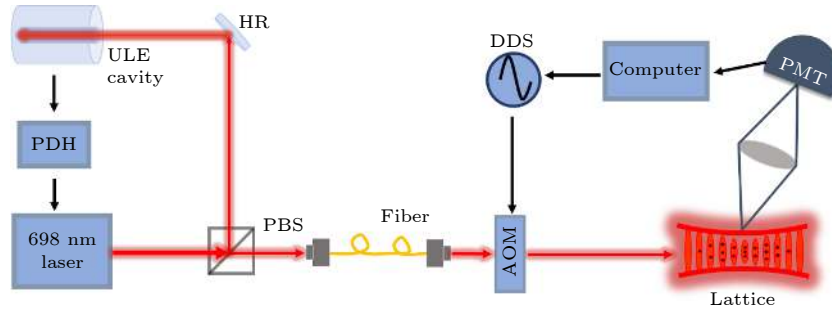


图 1 测量零温漂点的实验装置

Fig. 1. Schematic setup for zero-crossing temperature measurement.

当原子被装载进光晶格中, 利用 698 nm 超稳窄线宽激光进行钟跃迁谱线的探测, 实验装置如图 1 所示. 698 nm 超稳窄线宽激光经过 PDH 技术锁定后, 利用光纤将激光传输到 ^{87}Sr 光晶格钟物理系统所在的实验平台上, 然后入射到光晶格中, 用来激发铯原子 $(5s^2)^1\text{S}_0-(5s5p)^3\text{P}_0$ 能级跃迁. 最后, 通过 AOM 扫描 698 nm 超稳窄线宽激光的频率, 得到不同频率下的原子跃迁几率, 即钟跃迁谱线. 根据探测到的钟跃迁谱线的中心频率反馈控制 AOM 的工作频率, 从而实现 ^{87}Sr 光晶格钟的闭环锁定. 在实验中, $f_{\text{atom}} = f_{\text{AOM}} + f_{\text{ULE}}$, f_{atom} 为铯原子 $(5s^2)^1\text{S}_0-(5s5p)^3\text{P}_0$ 跃迁频率, f_{AOM} 为 AOM 的工作频率, f_{ULE} 为 ULE 腔的共振频率. 由于 f_{atom} 是不变的, 即 $\Delta f_{\text{AOM}} = \Delta f_{\text{ULE}}$ (Δf_{AOM} 为 AOM 的工作频率变化量, Δf_{ULE} 为 ULE 腔的共振频率变化量), 所以, 通过测量不同温度下 f_{AOM} 的值, 根据二阶多项式拟合 AOM 的工作频率随温度的变化曲线, 可得 AOM 的工作频率变化率最小值所对应的温度点, 即零温漂点.

3 测量结果与分析

将 ULE 腔的温度设置为 31.11 °C, 通过扫描 AOM 的工作频率, 得到的 ^{87}Sr 光晶格钟的钟跃迁谱线, 如图 2 所示. 其中, 黑色空心圆圈表示实验数据, 红色实线为洛伦兹函数非线性拟合曲线. 从图中的拟合结果可知, AOM 的工作频率为 231126364 Hz, 对应的谱线线宽为 9 Hz.

利用温度控制器分别将 ULE 腔的温度设定在多个温度点上, 为了使 ULE 腔达到更好的热平衡状态, 温度改变 5 d 后再进行测量, 从而得到多个温度点对应的钟跃迁谱线. 钟跃迁谱线中心频率 (即对应的 AOM 的工作频率) 随温度的变化关系

如图 3 所示, 其中, 黑色空心圆圈表示实验测量数据, 红色的实线表示二阶多项式拟合曲线. 根据拟合结果可得 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的零温漂点为 30.63 °C, 误差为 0.42 °C. 与 ULE 腔条件相似的情况进行对比, 实验中测量得到的结果与中国科学院武汉物理与数学研究所铯原子光钟实验小组测得的结果 [13] 相符合, 由于测量的温度点略少, 所以对数据进行二阶多项式拟合时, 引起的测量误差略大.

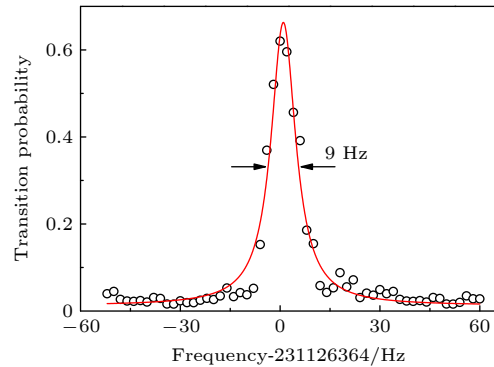


图 2 归一化钟跃迁谱线

Fig. 2. Normalized excitation spectra of clock transition.

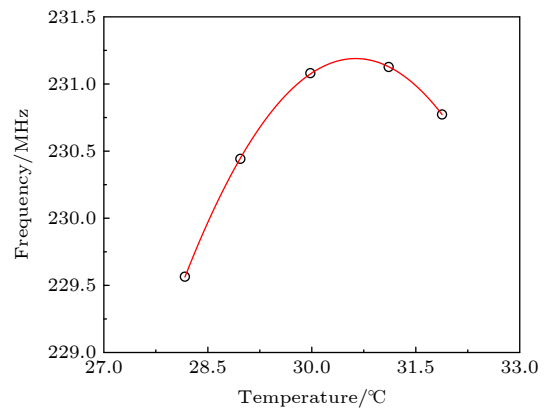


图 3 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔零温漂点的测量
Fig. 3. Measurements at different controlled temperatures clock transition spectra.

铯原子钟跃迁频率为 429228004229873 Hz, 通过计算得到 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的共振频率 ν_0 为 429228235463189 Hz. 从二阶多项式 ($y = ax^2 + bx + c$) 的拟合结果, 得到二次项系数 a 为 0.269. 通过 (4) 式对比, 可得 $\alpha = 2a/\nu_0$, 将 a 与 ν_0 的值代入, 即可得到 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的热膨胀系数的有效线性温度系数 α 为 1.25 ppb/K².

当零温漂点确定后, 将 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的温度设置为零温漂点, 利用铯原子光晶格钟的闭环锁定, 测量了 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔零温漂点处的频率漂移以及频率不稳定性. 铯原子光晶格钟闭环锁定的钟跃迁频率随时间的变化情况如图 4(a) 所示. 可以看出, 698 nm 超稳窄线宽激光的频率漂移总体呈线性趋势. 通过对实验数据进行线性拟合, 得到 698 nm 超稳窄线宽激光系统的线性漂移率为 0.15 Hz/s. 图 4(a) 中的插图为 698 nm 超稳窄线宽激光频率漂移率随时间的变化情况. 由图 4(a) 中插图的数据可知, 在 88% 的测量时间内, 698 nm 超稳窄线宽激光的频率漂移率都在 ± 0.3 Hz/s 以内. 利用图 4(a) 中的数据, 计算阿仑偏差, 结果如图 4(b) 所示, 其中, 黑色方点为阿仑偏差数据, 方点上的线为误差棒. 从图 4(b) 中可以看出, 在 3.744 s 的平均时间内, 698 nm 超稳窄线宽激光系统的不稳定度约为 1.6×10^{-15} . 在 3.744 s 以后, 随着频率漂移的增加, 698 nm 超稳窄线宽激光系统的频率不稳定度逐渐变大.

据可知, 在 88% 的测量时间内, 698 nm 超稳窄线宽激光的频率漂移率都在 ± 0.3 Hz/s 以内. 利用图 4(a) 中的数据, 计算阿仑偏差, 结果如图 4(b) 所示, 其中, 黑色方点为阿仑偏差数据, 方点上的线为误差棒. 从图 4(b) 中可以看出, 在 3.744 s 的平均时间内, 698 nm 超稳窄线宽激光系统的不稳定度约为 1.6×10^{-15} . 在 3.744 s 以后, 随着频率漂移的增加, 698 nm 超稳窄线宽激光系统的频率不稳定度逐渐变大.

4 结 论

本文利用原子的钟跃迁谱线测量了 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的零温漂点, 得到的 ULE 腔的零温漂点为 30.63 °C. 在零温漂点处, 测得 698 nm 超稳窄线宽激光的线性漂移率为 0.15 Hz/s, 频率不稳定度为 1.6×10^{-15} @3.744 s. 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔零温漂点的确定, 对于 698 nm 超稳窄线宽激光系统的意义重大, 不仅有助于提高 698 nm 超稳窄线宽激光系统的不稳定度, 还有助于提高 ⁸⁷Sr 光晶格钟系统的不稳定度. 在今后的工作中, 我们将对 698 nm 超稳窄线宽激光系统 ULE 腔的温度控制系统进行改进, 提高 ULE 腔的温度控制精度, 减小测量误差, 从而得到更精确的零温漂点, 更进一步地提高 698 nm 超稳窄线宽激光系统的频率不稳定度.

参考文献

- [1] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E, Schmidt P O 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 637
- [2] Blatt S, Ludlow A D, Campbell G K, et al. 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 140801
- [3] Godun R M, Nisbet-Jones P B R, Jones J M, King S A, Johnson L A, Margolis H S, Szymaniec K, Lea S N, Bongs K, Gill P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 210801
- [4] Huntemann N, Lipphardt B, Tamm C, Gerginov V, Weyers S, Peik E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 210802
- [5] Derevianko A, Pospelov M 2014 *Nat. Phys.* **10** 933
- [6] Weislo P, Morzyński P, Bober M, Cygan A, Lisak D, Ciuryło R, Zawada M 2016 *Nat. Astron.* **1** 0009
- [7] Hees A, Guéna J, Abgrall M, Bize S, Wolf P 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 061301
- [8] Roberts B M, Blewitt G, Dailey C, Murphy M, Pospelov M, Rollings A, Sherman J, Williams W, Derevianko A 2017 *Nat. Commun.* **8** 1195
- [9] Adhikari R X 2014 *Rev. Mod. Phys.* **86** 121
- [10] Kolkowitz S, Pikovski I, Langellier N, Lukin M D, Walsworth R L, Ye J 2016 *Phys. Rev. D* **94** 124043
- [11] Fox R W 2008 *Proc. SPIE, Photonics North* **7099** 70991R

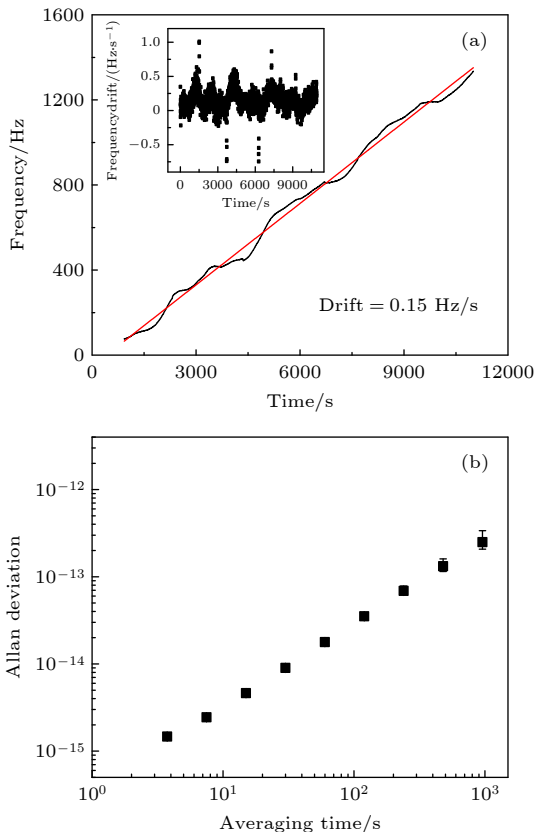


图 4 (a) 698 nm 激光频率随时间的漂移; (b) 698 nm 激光系统的频率不稳定性

Fig. 4. (a) 698 nm laser frequency drift with the time; (b) fractional frequency instability of the 698 nm laser.

- [12] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, Fox R W, Sherman J A, Ma L S, Oates C W 2011 *Nat. Photonics* **5** 158
- [13] Liu H, Jiang K L, Wang J Q, Xiong Z X, He L X, Li B L 2018 *Chin. Phys. B* **27** 053201
- [14] Lin Y G, Fang Z J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 160604 (in Chinese) [林弋戈, 方占军 2018 物理学报 **67** 160604]
- [15] Muller H, Peters A, Chu S 2010 *Nature* **463** 926
- [16] Wang C, Ji Z, Gong T, et al. 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 455104
- [17] Thomas L, Thomas K, Uwe S 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 914
- [18] Zhang J, Luo Y X, Ouyang B, Deng K, Lu Z H, Luo J 2013 *Eur. Phys. J. D* **67** 46
- [19] Berthold J W, Jacobs S F 1976 *Appl. Opt.* **15** 2334
- [20] Lu X T, Li T, Kong D H, Wang Y B, Chang H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 233401 (in Chinese) [卢晓同, 李婷, 孔德欢, 王叶兵, 常宏 2019 物理学报 **68** 233401]
- [21] Lu X T, Yin M J, Li T, Wang Y B, Chang H 2020 *Appl. Sci.* **10** 1440
- [22] Gao F, Liu H, Xu P, Wang Y B, Tian X, Chang H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 140704 (in Chinese) [高峰, 刘辉, 许鹏, 王叶兵, 田晓, 常宏 2014 物理学报 **63** 140704]
- [23] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [24] Wang Y B, Yin M J, Ren J, Xu Q F, Lu B Q, Han J X, Guo Y, Chang H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 023701

Zero-crossing temperature of ultra-stable optical reference cavity measured by optical transition spectrum*

Li Ting¹⁾²⁾ Lu Xiao-Tong¹⁾²⁾ Zhou Chi-Hua¹⁾²⁾ Yin Mo-Juan¹⁾
Wang Ye-Bing^{1)†} Chang Hong^{1)2)‡}

1) (*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards of Chinese Academy of Sciences, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 16 October 2020; revised manuscript received 3 December 2020)

Abstract

In an experimental system of ^{87}Sr atomic optical lattice clock, the free-running 698 nm diode laser is locked in an ultra-stable optical reference cavity to obtain the ultra-stable narrow linewidth laser with good short-term frequency stability. The ultra-stable optical reference cavity, which is usually composed of glass material doped with titanium dioxide for ultra-low thermal expansion coefficient and two highly reflective fused quartz mirrors, is called ULE cavity. The cavity length is prone to being affected by mechanical vibration, temperature change, airflow, etc. The stability of the cavity length determines the stability of the final laser frequency. Near the room temperature, there exists a special temperature point for the ultra-low expansion glass material, at which temperature its thermal expansion coefficient becomes zero, which is called the zero-crossing temperature. At the zero-crossing temperature, the length of the ULE cavity is not sensitive to the temperature fluctuation, reaching a minimum value, and the laser locked to the ULE cavity has a minimum frequency drift. In order to reduce the influence of temperature on the laser frequency instability, the zero-crossing temperature of the ultra-stable optical reference cavity of 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system is measured by using the clock transition spectrum of the strontium atomic optical lattice clock. The frequency drift and frequency instability of the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system at zero-crossing temperature are measured by using the change of the in-loop locked clock frequency of strontium atomic optical lattice clock. By scanning

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11803042, 61775220), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFF0200201), the Key Research Project of Frontier Science of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SSW-JSC004), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2019400).

† Corresponding author. E-mail: wangyebing@ntsc.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

the atomic clock transition frequencies at different temperatures, the clock transition spectra at different temperatures are obtained. The second order polynomial fitting of the central frequency of the clock transition spectrum with the change curve of temperature is carried out, and the zero-crossing temperature of the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system ULE cavity is measured to be 30.63 °C. At the zero-crossing temperature, the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser frequency is used for in-loop locking of ^{87}Sr atomic optical lattice clock. The linear drift rate of the ULE cavity in the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system is measured to be 0.15 Hz/s, and the frequency instability of the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system is 1.6×10^{-15} at an average time of 3.744 s. The determination of ULE cavity zero-crossing temperature for the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system is of great significance in helping to not only improve the instability of the laser system, but also increase the instability of ^{87}Sr optical lattice clock system. In the future, we will improve the temperature control system of the ULE cavity in the 698 nm clock laser system, enhancing the temperature control accuracy of the ULE cavity and reducing the measurement error, thus achieving a more accurate zero-crossing temperature and further improving the frequency instability of the 698 nm ultra-stable narrow linewidth laser system.

Keywords: ultra-stable optical reference cavity, frequency drift, clock transition spectra, zero-crossing temperature

PACS: 37.10.Jk, 42.62.Fi, 32.70.Jz

DOI: [10.7498/aps.70.20201721](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201721)