量子光学学报 28(4):288 – 295, 2022
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20222804.0201

置于超高真空环境且控温的超稳光学腔的腔线宽及零膨胀温度点测定

卢飞飞[1]， 白建东[1,2†]， 侯晓凯[1]， 王欣[1]， 郝丽丽[1]， 何军[1,3]， 王军民[1,3†]

（1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学光电研究所 山西 太原 030006；

2. 中北大学理学院物理系 山西 太原 030051

3. 山西大学 极端光学协同创新中心 山西 太原 030006）

摘要：高精细度超稳光学法布里 - 珀罗腔可以提供高精度的频率标准和频率分辨能力，在光学频率原子钟和量子精密测量等领域发挥重要作用，将其控温至零膨胀温度点可进一步有效提高超稳光学腔共振频率的稳定度。实验中构建了一套由超低膨胀系数的微晶玻璃材料制作的球型平凹 F-P 腔，镀有 1560.5 nm 和 637.2 nm 双波长高反多层介质膜，放置于可以精确控温的超高真空系统中。利用射频调制边带法测量得到超稳光学腔的自由光谱区为 3.145 GHz，腔线宽 ∼ 100 kHz，得到超稳光学腔在设定波长的精细度可高达 30 000 以上。在此基础上通过倍频波导器件将 1560.5 nm 激光倍频至 780.25 nm，利用超稳光学腔共振频率和铷原子饱和吸收谱的对比，获得超稳光学腔在不同温度下共振频率的精确数值，根据相对腔长变化测量超稳光学腔系统的热膨胀特性，拟合得到零膨胀温度为 (10.688 ± 0.115) °C。高精细度光学腔提供了稳定的频率基准，同时可有效压窄激光线宽，抑制相位噪声，是产生优质光源的重要工具。我们已将其优异的短期频率稳定性和极低的频率噪声应用于通过高稳定度的 637.2 nm 红光腔增强倍频实现高稳定度的 318.6 nm 窄线宽紫外激光，进一步用于铯原子单步里德堡直接激发和里德堡缀饰基态铯原子系综方面的研究。

关键词：F-P 腔； 零膨胀温度点； ULE 超稳光学腔； 热膨胀特性

中图分类号：O562 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-6654(2022)04-0288-08

0 引言

光学法布里 - 珀罗（Fabry-Perot）腔作为现代原子分子与光物理学中的基本器件之一，在激光稳频、光谱分析等领域有重要应用[1–3]，而置于超高真空环境中，由超低膨胀（ULE）系数材料制成的超稳光学腔的应用必然会在激光技术的实际测量中具有更高的稳定性和控制精度[4]，广泛应用于光学频率原子钟、量子精密测量等领域[5–7]。

目前，基于中性原子的光晶格钟已经达到 10^{-18} 的频率不确定度[8]，超越微波频率标准，有望成为下一代的时间频率基准[9]。超稳窄线宽激光系统作

收稿日期：2022-08-08； **接受日期**：2022-08-29

基金项目：国家重点研发计划课题（2021YFA1402002）；国家自然科学基金（11974226；61875111；12104417）；山西省基础研究计划项目（20210302124161）

作者简介：卢飞飞（1997–），男，汉族，山西临汾人，硕士研究生，主要研究方向为冷原子物理

† **通信作者**：白建东，E-mail：jdbai@nuc.edu.cn 王军民，E-mail：wwjjmm@sxu.edu.cn

为本地振荡器，是获得钟跃迁谱线，实现光钟闭环锁定的基础。超稳光学参考腔作为原子光钟系统中的重要组成部分，为超稳窄线宽钟激光提供了一个稳定的频率基准，对提高光晶格钟不确定度有重要作用。除此，获得窄线宽、低相位噪声、频率稳定的激光光源对基于单光子或双光子跃迁的基态到里德堡态的相干激发至关重要[10]。通过将激光锁定于超高精度的光学腔不仅可有效抑制激光相位噪声，并且对于锁定于同一超稳腔的激光具有确定的相位关联信息，可显著提高基态和里德堡态之间的相干寿命，促进中性里德堡态原子微波测量和量子计算等领域的发展。

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，热膨胀系数一般可达到 3×10^{-8}，一方面通过设计优化腔体机械结构和将腔放置于超高真空环境中来保证自身的机械稳定性，另一方面通过对腔体温度的高精度控制来减少环境温度改变引起的腔长变化[11−12]。ULE 材料在处于一个特殊温度点时，其腔长变化对温度极不敏感，有更好的稳定性和更小的漂移，我们称其为零膨胀温度[13]。因此，对零膨胀温度点的测量在高精细度光学腔的实际应用中尤为重要。

多种手段发展用来测量 ULE 超稳腔零膨胀温度，其大多是通过标定一个标准频率来观测超稳光学腔共振频率随温度的变化得到热膨胀性质。2017 年，中国科学院武汉物理与数学研究所[14] 通过光学频率梳测量不同温度下锁定于 ULE 腔上激光的绝对频率得到零膨胀温度。2011 年美国国家标准与技术研究所[15] 使用稳定性更高的 ULE 腔作为参考，通过测量 ULE 腔共振频率随温度的变化得到零膨胀温度，测量误差为 0.1 °C。2017 年，王兴昌等人[16] 以铯原子饱和吸收谱作为标准频率，通过光学腔的共振频率随温度的变化得到零膨胀温度。2020 年，中国科学院国家授时中心[17] 利用更窄的钟跃迁谱线测量得到超稳光学参考腔的零膨胀温度。虽然飞秒光学梳系统可通过扩谱测量从可见光到近红外领域内所有光学频率，可满足大部分波段超稳腔稳定度的测量，但成本高，操作困难。利用原子谱线作为标准频率测量零膨胀温度点成本较低，操作简单，但只限于超稳腔波长范围有对应的特定原子分子或离子谱线，而通过非线性晶体或波导器件将激光频率转换至合适的原子谱线范围，可突破实验室条件的限制，极大扩展了通过谱线频率可测量的超稳光学腔波长范围，可广泛应用于实验室测量中。

在本文中，我们设计并制备了一套放置于超高真空中可精确控温的 1560.5 nm 和 637.2 nm 双波长 ULE 超稳光学腔，并对其参数做了相关测量。同时，通过 PPMgO:LN 倍频波导将 1560.5 nm 激光倍频至 780.25 nm，以铷原子饱和吸收谱作为标准频率，通过标定跟踪超稳光学腔特定参考腔模的共振频率得到超稳光学腔腔长的相对变化，拟合得到该超稳光学腔的零膨胀温度点。文章第二部分主要介绍了实验方案和理论分析。第三部分对实验结果进行讨论和说明。第四部分是对实验的总结和展望。

1　实验方案

实验中，我们定制并构建的超稳光学腔是由超低膨胀系数的微晶玻璃材料制作的球型平凹 F-P 腔及腔体，凹面镜的曲率半径为 500 mm，腔镜内表面镀有 1560.5 nm 和 637.2 nm 高反膜，外表面镀有增透膜。它被放置于一个高精度温控的超高真空系统中，控温精度为 0.01 °C，真空度为 3×10^{-9} Torr，由一个抽速为 8 L/s 的离子泵来维持高真空。图 1 为超稳腔真空系统照片，其主要由真空腔体、过渡三通管道、离子泵、金属角阀和超稳腔构成，右下角为球型超稳腔的腔体及固定方式。

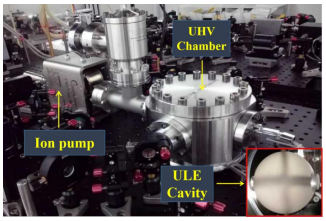
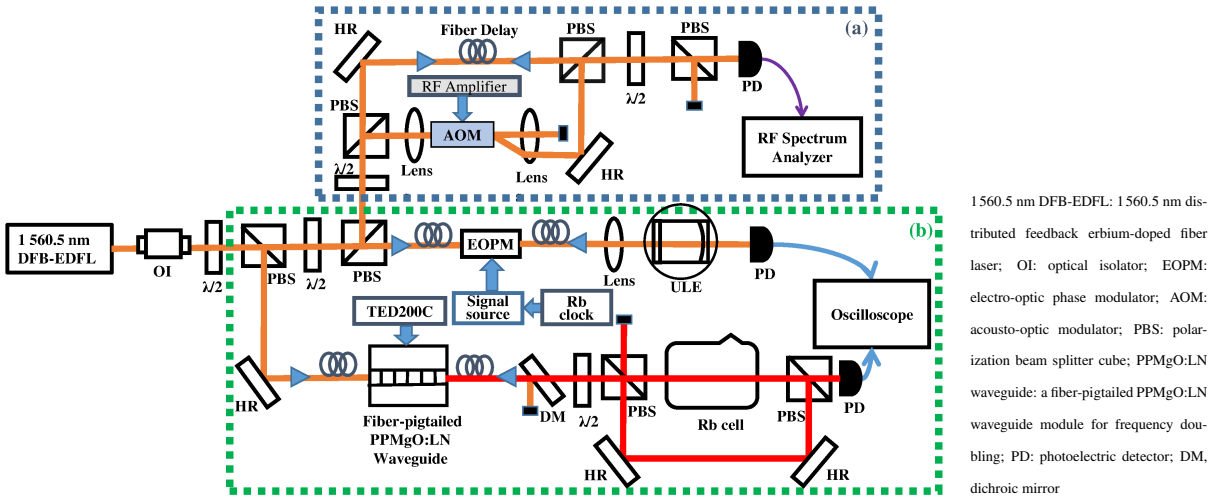


Fig. 1 Picture of ULE ultra-stable optical cavity and vacuum system

图 1 ULE 超稳光学腔及其真空系统照片

为了测量超稳光学腔的基本参数和热膨胀特性，我们采用如图 2 所示的实验装置图。我们使用输出波长为 1560.5 nm 激光的分布反馈式掺铒光纤激光器（DFB-EDFL@1560.5 nm）作为光源，激光器上装有压电陶瓷（PZT），可实现对激光频率的调谐。实验前通过光纤延时声光频移自差拍法标定其线宽，如图 2(a)。激光一路在信号发生器驱动下经过声光调制器（AOM）产生频移 80 MHz 的一级衍射光，另一路经过 5.1 km 的单模光纤延时，经偏振

分光棱镜（PBS）合束后以相同的偏振和功率进入快速光电探测器（New Focus，Model 1554-B），通过射频频谱分析仪（Agilent，Model E4405B）读取拍频信号，拟合得到激光器线宽。如图 2(b) 为测量超稳光学腔零膨胀温度的光路图。光束经过光隔离器（OI）和 PBS 后，一路通过 PPMgO:LN 倍频波导将 1560.5 nm 激光倍频至 780.25 nm，扫描激光频率得到铷原子的饱和吸收谱，一路经过电光相位调制器（EOPM）后在激光上加一调制信号，其中，信号源（Agilent，Model E8257C）锁定于参考信号为 10 MHz 的铷原子钟（SRS，Model FS725）上来保证调制频率的稳定度，在调节匹配 ULE 超稳光学腔后，可以通过腔模所加边带得到频率标尺。我们希望通过选定铷原子饱和吸收谱的一个标准频率得到不同温度下 ULE 超稳光学腔共振频率，通过拟合 ULE 超稳光学腔相对腔长的变化得到零膨胀温度。



1560.5 nm DFB-EDFL: 1560.5 nm distributed feedback erbium-doped fiber laser; OI: optical isolator; EOPM: electro-optic phase modulator; AOM: acousto-optic modulator; PBS: polarization beam splitter cube; PPMgO:LN waveguide: a fiber-pigtailed PPMgO:LN waveguide module for frequency doubling; PD: photoelectric detector; DM, dichroic mirror

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup. (a) Schematic diagram for measuring laser linewidth based on fiber-delayed and AOM-shifted self-heterodyne scheme. (b) Schematic diagram for measuring the zero-expansion temperature

图 2 实验装置示意图：（a）光纤延时、声光频移自差拍法测线宽装置示意图；（b）测量零膨胀温度点装置示意图

2　实验测量和结果

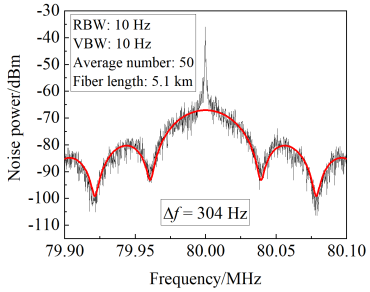


Fig. 3 DFB-EDFL@1560.5 nm beat note signal and fitting curve

图 3 DFB-EDFL@1560.5 nm 拍频信号及拟合曲线

实验中通过短光纤延时声光频移自差拍法[18–19]得到了 DFB-EDFL@1560.5 nm 的拍频谱，如图 3。所用光纤长度为 5.1 km，拟合得到激光线宽约为 304 Hz，预估相对于我们要测量的超稳腔线宽已足够窄，同时激光功率输出稳定，完全满足本实验的测量要求。

2.1 超稳光学腔参数测量

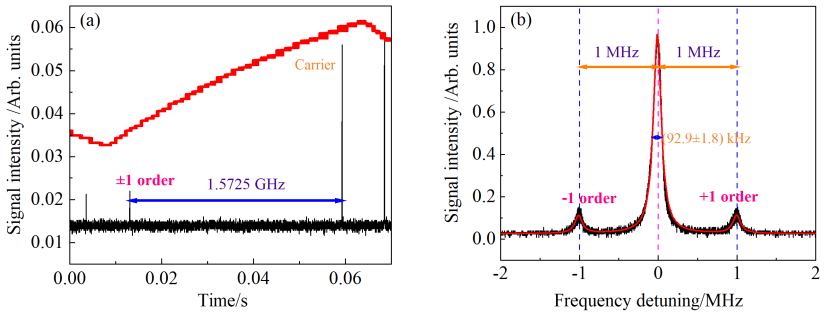
我们通过调制边带法测量超稳光学腔的自由光谱区、腔长、腔线宽及腔精细度。在完成激光与超稳光学腔的模式匹配后，我们使用射频源通过 EOPM 在 1560.5 nm 激光上加一个调制频率为 Ω、功率为 14 dBm 的调制信号，透过超稳光学腔后的透射峰有 ±1 级两个边带。逐渐增大调制频率 Ω，让相邻两个透射峰的 +1 级和 −1 级边带逐渐靠近，直到两个边带完全重合（如图 4a）。此时，EOPM 上所加调制频率的大小为 1.5725 GHz，是超稳光学腔自由光谱区（FSR）的一半。因此，超稳光学腔的自由光谱区为 3.145 GHz，由 $FSR = c/(2nL)$ 计算可得超稳腔的腔长约为 47.6 mm，其中，c 为光速，n 为介质折射率，腔体处于真空环境中，$n = 1$，L 为腔长。此外，我们也用边带标定的方法测量了超稳光学腔在 1560.5 nm 激光上的腔线宽。如图 4(b)，腔模所加一级调制边带的频率为 1 MHz，以该边带作为频率标尺，拟合得到透射谱的半高全

宽 $\Delta\nu$ 约为 (92.9 ± 1.8) kHz。我们标定得到的激光线宽为 304 Hz，远远小于 93 kHz，因此，我们通过边带标定测量的线宽即为腔线宽，用该激光系统对超稳光学腔线宽的测量是可靠准确的。由此得到超稳光学腔在 1560.5 nm 激光波长上的精细度为 Finesse $= FSR/\Delta\nu \approx 33853\pm1312$。同理，我们测得超稳光学腔在 637.2 nm 激光波长上的精细度约为 30 000，腔线宽为 105 kHz。

腔衰荡光谱技术是测量光学腔精细度的一种常规且有效的方法[20]。当激光频率与超稳腔共振时，腔内激光强度显著增大，待腔模完全建立后，主动关断入射光源，这时腔内的激光强度不会立刻消失，而是随时间指数衰荡为零。我们可以通过快速光电探测器对该衰荡谱进行探测并拟合得到衰荡时间 τ_S，进而由

$$\tau_S = \frac{L}{c(1-R)}, \qquad F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

得到对应腔的精细度，其中，R 为镜面反射率，F 为腔的精细度。图 5 为 1560.5 nm 激光的腔衰荡光谱，拟合得到衰荡时间为 1.8715 μs，对应腔的精细度约为 37000，同理得到 637.2 nm 激光对应腔的精细度约为 30200，与我们利用边带标定的方法测量得到的超稳腔精细度是接近的，证明我们的测量是相对准确的。



(a) Measurement of free spectral range of ultra-stable cavity by RF modulation sideband method. The black line represents the resonant cavity mode and sideband, and the red line represents the scanning voltage. At this time, the ±1 order sidebands of adjacent cavity modes completely coincide, and the modulation frequency of RF source is 1.5725 GHz, the free spectral range of the ultra-stable cavity is 3.145 GHz, cavity length is 47.6 mm. (b) The cavity linewidth of the ultra-stable optical cavity is measured by the modulation sideband method. The black line is the cavity mold and ±1 order sideband, and the red line is the Lorentz function fitting curve. The modulation frequency of the RF source is 1 MHz and the linewidth of the ultra-stable optical cavity at 1560.5 nm is (92.9 ± 1.8) kHz, corresponding cavity fineness $\approx 33853\pm1312$

（a）射频调制边带法测量超稳光学腔的自由光谱区。黑色曲线表示共振腔模及边带，红色曲线为激光频率扫描电压。此时，相邻腔模的 ±1 级边带完全重合，射频源所加调制频率为 1.5725 GHz，因此得到超稳腔自由光谱区为 3.145 GHz，腔长为 47.6 mm。（b）调制边带法测量超稳光学腔的腔线宽。黑色曲线为腔模及 ±1 级边带，红色曲线为 Lorentz 函数拟合曲线。射频源所加调制频率为 1 MHz，测得超稳光学腔在 1560.5 nm 处的线宽为 (92.9 ± 1.8) kHz，对应的腔精细度 $\approx 33853\pm1312$

Fig. 4 Measurement of parameters of ultra-stable optical cavity by RF modulation sideband method

图 4 射频调制边带法测量超稳光学腔参数

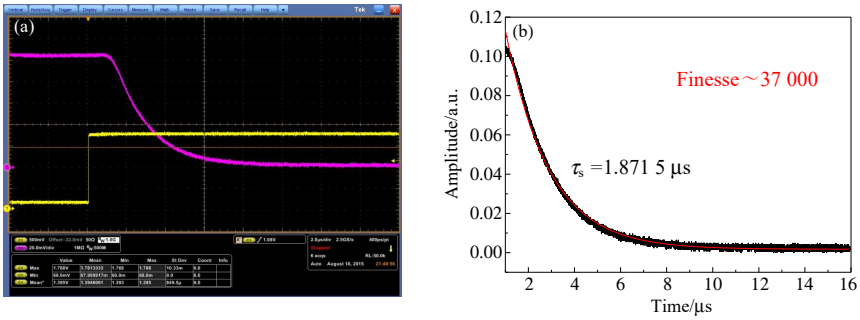


Fig. 5 Cavity ring-down spectrum of 1560.5 nm laser; The ring-down time is 1.8715 μs, the fineness is 37000

图 5 1560.5 nm 激光的腔衰荡光谱；拟合得到衰荡时间为 1.8715 μs，对应腔的精细度为 37000

2.2 超稳光学腔零膨胀温度点的测量

ULE 腔的温度及其波动会引起腔长的变化，ULE 腔的相对长度变化与温度变化关系[21]为：

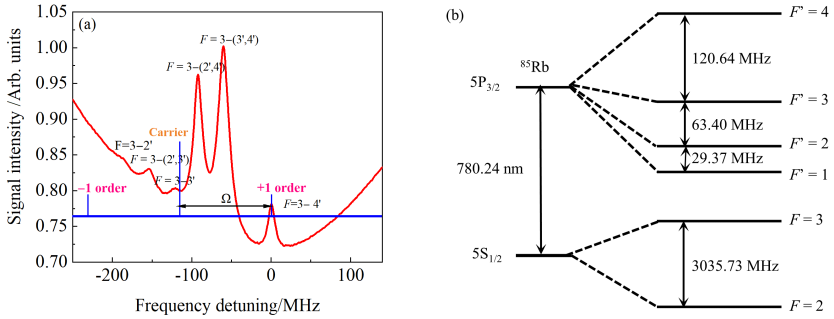
$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{a}{2}(T-T_0)^2+\frac{b}{3}(T-T_0)^3+C_0, \tag{1}$$

其中，ΔL 为腔长变化量，L 为腔长，a 为热膨胀系数的有效线性温度系数，T 为实际温度，T_0 为零膨胀温度点，b 为二阶温度系数，C_0 为积分常数，由初始条件确定。

温度改变对 ULE 腔腔长的影响极小，难以测量，因此，我们通常将 ULE 相对腔长随温度的改变转化为相对频率变化量的测量。如图 6 所示，我们在示波器上可观察到铷原子的饱和吸收光谱和共振腔模及所加边带，我们以饱和吸收谱作为频率标准对横轴坐标进行了处理，其中，定义 $5S_{1/2}(F=3)\leftrightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$ 的频率失谐量为 0。需要注意的是，当激光由 1560.5 nm 倍频至 780.25 nm 后，饱和吸收谱的频率与腔模的频率呈 2 倍关系。我们选定 ^{85}Rb 原子 D_2 线 $5S_{1/2}(F=3)\leftrightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$ 作为标准频率 ω_{atom}，并选定距离标准频率最近的超稳光学腔共振腔模作为参考腔模。调节射频源加在 EOPM 上的调制频率 Ω 使参考腔模的边带与选定的标准频率对应的铷原子超精细跃迁峰严格重合，则由：

$$\omega_{\text{atom}}=2(\nu_q+\Omega), \tag{2}$$

可得到参考腔模的绝对频率 ν_q。



(a) Saturated absorption spectra for ^{85}Rb and reference cavity mode and sideband. $F=3\rightarrow F'=4$ is selected as the standard frequency, and the number of modes of the reference cavity mode for calibration and tracking is 61 086. Adjust the modulation frequency Ω added to the EOPM. At this time, the +1 sideband of the reference cavity mode completely coincides with the standard frequency. (b) D_2 line energy level diagram and frequency interval of ^{85}Rb

（a）^{85}Rb 原子 D_2 线饱和吸收谱与参考腔模及边带。选定 $F=3\rightarrow F'=4$ 作为标准频率，标定跟踪的参考腔模的模式数为 61 086。调节加在 EOPM 上的调制频率 Ω，此时，参考腔模的 +1 级边带与标准频率完全重合。（b）^{85}Rb 原子 D_2 线能级图及频率间隔

Fig. 6 Measure the zero-expansion temperature

图 6 测量零膨胀温度

F-P 腔沿轴线方向传播的光在腔内能够稳定振荡时，其频率满足：

$$\nu_q=q\cdot FSR, \tag{3}$$

其中，q 为纵模模式数。本实验中，计算得到标定跟踪的参考腔模的模式数为 61 086。通过标定跟踪该模式数下腔模的绝对频率，并由 FSR 及腔长 L 的计算关系：

$$FSR=\frac{c}{2nL}, \tag{4}$$

可以得到：

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{qc}{2nL(\frac{\omega_{\text{atom}}}{2}-\Omega)}-1。 \tag{5}$$

由此，通过改变 ULE 超稳光学腔的温度值，经过 12 h 以上，待系统处于热平衡状态时记录射频源给 EOPM 所加调制信号的大小得到腔体相对长度变化。

图 7 为选定 ^{85}Rb 原子 D_2 线 $5S_{1/2}(F=3)\leftrightarrow 5P_{3/2}(F'=4)$ 作为标准频率时 ULE 超稳光学腔相对腔长变化随温度变化的拟合曲线，拟合公式为等式 (1)。得到该超稳光学腔的零膨胀温度 $T_0=(10.687\pm0.114)$ °C，线性温度系数 $a=(1.292\pm0.039)\times10^{-9}/°C^2$，二阶温度系数 $b=(1.050\pm0.265)\times10^{-11}/°C^3$。

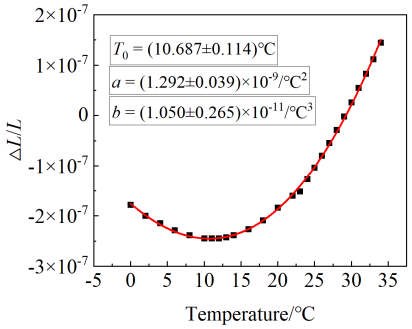
为了减小误差提高实验精度，我们希望通过选

定不同的标准频率，多次采取数据求取平均。如表 1 为分别选取 ^{85}Rb 原子 D_2 线 $F=3\leftrightarrow F'=4$，$F=3\leftrightarrow F'=3,4$ 和 $F=3\leftrightarrow F'=2,4$ 三组超精细跃迁谱线作为标准频率时拟合得到的零膨胀温度点和热膨胀系数。求取平均后最终得到零膨胀温度为 (10.688 ± 0.115) °C，热膨胀系数的有效线性温度系数为 $(1.291\pm0.039)\times10^{-9}/°C^2$, 二阶温度系数为 $(1.063\pm0.268)\times10^{-11}/°C^3$。

表 1 不同标准频率下测量得到的热膨胀参数

Tab. 1 Thermal expansion parameters measured at different standard frequencies

参考频率	零膨胀温度点 T_0/°C	热膨胀系数的有效线性温度系数 a/°C^2	二阶温度系数 b/°C^3
$F=3\leftrightarrow F'=4$	10.687 ± 0.114	$(1.292\pm0.039)\times10^{-9}$	$(1.050\pm0.265)\times10^{-11}$
$F=3\leftrightarrow F'=3,4$	10.689 ± 0.115	$(1.290\pm0.039)\times10^{-9}$	$(1.072\pm0.267)\times10^{-11}$
$F=3\leftrightarrow F'=2,3$	10.687 ± 0.117	$(1.290\pm0.040)\times10^{-9}$	$(1.068\pm0.271)\times10^{-11}$
平均值	10.688 ± 0.115	$(1.291\pm0.039)\times10^{-9}$	$(1.063\pm0.268)\times10^{-11}$



The zero expansion temperature $T_0=(0.687\pm0.114)$ °C, and the linear temperature coefficient $a=(1.292\pm0.039)\times10^{-9}/°C^2$, the second order temperature coefficient $b=(1.050\pm0.265)\times10^{-11}/°C^3$

该超稳光学腔的零膨胀温度 $T_0=(10.687\pm0.114)$ °C，线性温度系数 $a=(1.292\pm0.039)\times10^{-9}/°C^2$，二阶温度系数 $b=(1.050\pm0.265)\times10^{-11}/°C^3$

Fig. 7 Fitting curve of relative cavity length with temperature of ULE ultra-stable optical cavity

图 7 ULE 超稳光学腔相对腔长变化随温度变化的拟合曲线

3 结论

在本文中，我们设计并制备了一套放置于超高真空中可精确控温的 1 560.5 nm 和 637.2 nm 双波长 ULE 超稳光学腔，通过调制边带法对超稳光学腔的自由光谱区、腔长、腔线宽和精细度做了测量和计算。同时，通过光纤波导器件将 1 560.5 nm 激光倍频至 780.25 nm，利用超稳光学腔共振频率和铷原子饱和吸收谱的对比拟合得到该超稳腔的零膨胀温度为 (10.688 ± 0.115) °C。

实验中，值得注意的是，我们所测量的超稳腔线宽很窄，而作为标准频率的铷原子饱和吸收谱的自然线宽就远远大于腔线宽，因此，我们所能达到的精度是有限的，尤其是对于腔长更长，精细度更高的超稳光学腔来说，这种精度是不够的。在这里，我们更加强调的是通过频率转换的方式，利用原子谱线作为频率间隔的校准手段简单快速地在实验室条件下得到超稳腔的热膨胀特性。当然，我们可以通过优化饱和吸收谱的信噪比，采用饱和吸收光谱的微分谱线[22]，利用原子钟锁定校准激光频率的非线性度以及对频率间隔的标定等手段改善标定激光频率间隔的精度，提高测量精度。高精细度超稳光学腔可以提供高精度的频率标准，我们希望通过对超稳光学腔零膨胀温度的测量使其稳定度和精度有更显著的提高，用于铯原子单步里德堡直接激发和里德堡缀饰基态铯原子系综方面的研究[23–24]。

参考文献

[1] LI J, JIANG Y, YUAN Y, *et al*. Laser frequency instability of 2×10^{16} by stabilizing to 30-cm-long Fabry-Pérot cavities at 578 nm[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(14):18699. DOI: 10.1364/OE.26.018699.

[2] AIKAWA K, KOBAYASHI J, OASA K, *et al*. Narrow-linewidth light source for a coherent Raman transfer of ultracold molecules[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(15):14479–14486. DOI: 10.1364/OE.19.014479.

[3] ENOMOTO K, HIZAWA N，SUZUKI T，*et al*. Comparison of resonance frequencies of major atomic lines in 398∼423 nm[J]. *Appl Phys B*, 2016, **122**(5):126. DOI: 10.1007/s00340-016-6400-5.

[4] BAI J D, WANG J Y, HE J, *et al*. Electronic sideband locking of a broadly tunable 318.6 nm ultraviolet laser to an ultra-stable optical cavity[J]. *J Opt*, 2017, **19**(4):045501. DOI: 10.1088/2040-8986/aa5a8c.

[5] MASOUDI A A, DÖRSCHER S, HÄFNER S, *et al*. Noise and instability of an optical lattice clock[J]. *Phys Rev A*, 2015, **92**(6):063814. DOI: 10.1103/PhysRevA.92.063814.

[6] WANG Y B, YIN M J, REN J, *et al*. Strontium optical lattice clock at the national time service center[J]. *Chin Phys B*, 2018, **27**(2):023701. DOI: 10.1088/1674-1056/27/2/023701.

[7] LIU H, JIANG K L, WANG J Q, *et al*. Precise calibration of zero-crossing temperature and drift of an ultralow expansion cavity with a clock transition spectrum[J]. *Chin Phys B*, 2018, **27**(5):053201. DOI: 10.1088/1674-1056/27/5/053201.

[8] BLOOM B J , NICHOLSON T L, WILLIAMS J R, *et al*. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. *Nature*, 2014, **506**(7486):71–75. DOI: 10.1038/nature12941.

[9] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, *et al*. Optical atomic clocks[J]. *Rev Mod Phys*, 2015, **87**(2):637. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.637.

[10] MADJAROV I S, COVEY J P, SHAW A L, *et al*. High-fidelity entanglement and detection of alkaline-earth Rydberg atoms[J]. *Nat Phys*, 2020, **16**(8):857–861. DOI: 10.1038/s41567-020-0903-z.

[11] FOX R W. Fabry-Perot temperature dependence and surface-mounted optical cavities[J]. *Proc SPIE*, 2008, **7099**:70991R. DOI: 10.1117/12.806850.

[12] LUDLOW A D, HUANG X, NOTCUTT M, *et al*. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at 1×10^{-15}[J]. *Opt Let*, 2007, **32**(6):641–643. DOI: 10.1364/OL.32.000641.

[13] LEGERO T, KESSLER T, STERR U. Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, **27**(5):914–919. DOI: 10.1364/JOSAB.27.000914.

[14] 汪绍茂，商俊娟, 崔凯枫, 等. 基于制冷法布里 - 珀罗腔的激光频率漂移控制 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**:031401. DOI: 10.3788/LOP54.031401.
WANG S M, SHANG J J, CUI K F, *et al*. Laser frequency drift control based on refrigeration Fabry-Pérot cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**:031401. (in Chinese). DOI: 10.3788/LOP54.031401.

[15] FOX R W, SHERMAN J A, MA L S, *et al*. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16}-level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(3):158–161. DOI: 10.1038/nphoton.2010.313.

[16] 王兴昌, 李少康, 李刚, 等. 高热稳定性高精细度光学法布里 - 珀罗腔系统 [J]. 光学学报, 2017, **37**(1):168–172. DOI: 10.3788/AOS201737.0112004.
WANG X C, LI S K, LI G, *et al*. Optical Fabry-Pérot cavity system with high thermal stability and high finesse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(1):168–172. (in Chinese). DOI: 10.3788/AOS201737.0112004.

[17] 李婷, 卢晓同, 周驰华, 等. 利用钟跃迁谱线测量超稳光学参考腔的零温漂点 [J]. 物理学报, 2021, **70**(7):073701. DOI: 10.7498/aps.70.20201721.
LI T, LU X T, ZHOU C H, *et al*. Zero-crossing temperature of ultra-stable optical reference cavity measured by optical transition spectrum[J]. *Acta physica sinica*, 2021, **70**(7):073701. (in Chinese). DOI: 10.7498/aps.70.20201721.

[18] HUANG S, ZHU T, CAO Z, *et al*. Laser linewidth measurement based on amplitude difference comparison of coherent envelope[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2016, **28**(7):759. DOI: 10.1109/LPT.2015.2513098.

[19] 白建东, 王杰英, 王军民. 基于光纤延时声光频移自差拍法快速测量激光线宽 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53**(6):061407. DOI: 10.3788/LOP53.061407.
BAI J D, WANG J Y, WANG J M. Rapid measurement of laser linewidth based on fiber-delayed AOM-shifted self-heterodyne scheme[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(6):061407. (in Chinese). DOI: 10.3788/LOP53.061407.

[20] HERBELIN J M, MCKAY J A, KWOK M A, *et al*. Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method[J]. *Appl Opt*, 1980, **19**(1):144–147. DOI: 10.1364/AO.19.000144.

[21] ZHANG J, LUO Y X, OUYANG B, *et al*. Design of an optical reference cavity with low thermal noise limit and flexible thermal expansion properties[J]. *Eur Phys J D*, 2013, **67**(2):46. DOI: 10.1140/epjd/e2013-30458-2.

[22] 韩亚帅, 温馨, 白建东, 等. 采用铷原子射频频率调制光谱与调制转移光谱对 1 560 nm 激光经波导倍频至 780 nm 进行稳频的比较 [J]. 光学学报, 2014, **34**(5):0530002. DOI: 10.3788/AOS201434.0530002.
HAN Y S, WEN X, BAI J D, *et al*. Laser frequency stabilization of 1 560 nm laser after frequency doubling to 780 nm with a waveguide: radio-frequency frequency-modulation spectroscopy versus modulation transfer spectroscopy with Rb atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(5):0530002. (in Chinese). DOI: 10.3788/AOS201434.0530002.

[23] BAI J D, LIU S, WANG J Y, *et al*. Single-photon Rydberg excitation and trap-loss spectroscopy of cold cesium atoms in a magneto-optical trap by using of a 319-nm ultraviolet laser system[J]. *IEEE J Sel Top Quant Electr*, 2019, **26**(3):1–6. DOI: 10.1109/JSTQE.2019.2941483.

[24] ARIAS A, LOCHEAD G, WINTERMANTEL T M, *et al*. Realization of a Rydberg-dressed Ramsey interferometer and electrometer[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, **122**(5):053601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.053601.

Measurement of the Cavity Linewidth and the Zero-expansion Temperature of a Temperature-stabilized Ultra-stable Optical Cavity Placed in Ultra-High Vacuum Chamber

LU Fei-fei[1], BAI Jian-dong[1,2†], HOU Xiao-kai[1], WANG Xin[1], HAO Li-li[1], HE Jun[1,3], WANG Jun-min[1,3†]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China;*
2. *Department of Physics, North University of China, Taiyuan* 030051, *China;*
3. *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: High finesse ultra-stable optical Fabry-Perot (F-P) cavity can provide high-precision frequency standard and fine frequency resolution, it plays an important role in optical frequency atomic clock and quantum precision measurement, and controlling its temperature to the zero-expansion temperature can effectively improve the frequency stability. In the experiment, a set of spherical flat concave F-P cavities made of glass ceramics with ultra-low expansion (ULE) coefficient is designed and prepared. It is plated with 1 560.5 nm and 637 nm antireflection film and placed in an ultra-high vacuum system with accurate temperature control. Using the modulated sideband method, the free spectral range of the ultra-stable optical cavity is 3.145 GHz and the cavity linewidth is $\sim$ 100 kHz. The fineness of the ultra-stable optical cavity in the set wavelength laser can be more than 30 000. On this basis, the 1 560.5 nm laser is doubled to 780.25 nm by the frequency-doubling waveguide device. By comparing the resonant frequency of the ultra-stable optical cavity with the saturated absorption spectra of the rubidium atom, the accurate value of the resonant frequency of the ultra-stable optical cavity at different temperatures is obtained. According to the change of the relative cavity length, the thermal expansion characteristics of the ultra-stable optical cavity system are measured, and the zero expansion temperature is (10.688 ± 0.115) °C. The high finesse optical cavity provides a stable frequency reference, and can effectively narrow the laser linewidth and suppress phase noise. It is an important tool for generating high-quality laser sources. We have applied its excellent short-term frequency stability and extremely low-frequency noise to the 318.6 nm narrow linewidth ultraviolet laser with high stability through 637.2 nm laser cavity-enhanced frequency doubling, and further applied it to the study of cesium atom single-step Rydberg direct excitation and Rydberg dressed ground state cesium atom ensemble.

Keywords: F-P cavity; the zero-expansion temperature; ULE ultra-stable optical cavity; thermal expansion characteristics