

窄线宽激光在光学谐振腔腔长精密测量中的应用

焦东东, 高 静, 邓 雪, 许冠军, 董瑞芳, 刘 涛*, 张首刚

中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

摘要 提出了一种利用窄线宽激光作为测量光源, 对光学谐振腔自由光谱区、腔内共振激光波长进行精密测量而得到光学谐振腔腔长的方法。对光学谐振腔腔长的测量理论进行了严格推导, 通过理论模拟对测量条件及结果进行了分析讨论。以自行研制的线宽为 1.9 Hz、频率不稳定性为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 、中心波长为 1550 nm 的窄线宽激光作为光源, 对长度约 100 mm 的光学谐振腔腔长进行了精密测量。对光学谐振腔自由光谱区进行测量, 得到其腔长为 0.10024407 m、精度为 22 nm; 对光学谐振腔腔内共振激光波长进行测量, 得到其腔长为 0.1002440884 m、精度为 0.21 nm, 精度相对提高了 2 个量级。提出的方法有望促进基础物理研究、材料的物理属性精密测量及光纤传感等领域的发展。

关键词 测量; 窄线宽激光; 长度精密测量; 共振干涉; 自由光谱区; 光学谐振腔

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0112007

Application of Narrow Linewidth Laser in Precision Measurement of Optical Resonator Cavity Length

Jiao Dongdong, Gao Jing, Deng Xue, Xu Guanjun, Dong Ruifang, Liu Tao,
Zhang Shougang

Key Laboratory of Time and Frequency Standards, National Time Service Centre, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China

Abstract A new method for measuring cavity length of optical resonator is proposed by measuring the free spectral range of optical resonator and the intracavity resonance laser wavelength with narrow linewidth lasers as light sources. The measurement theory of optical resonator cavity length is strictly deduced, and the measurement conditions and results are analyzed and discussed by theoretical simulation. An optical resonator with cavity length about 100 mm is measured precisely with the developed narrow linewidth laser as light source, of which the linewidth is 1.9 Hz, the frequency instability is $1.7 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ and the central wavelength is 1550 nm. The free spectral region of the optical resonator is measured, and it is obtained that the cavity length of the optical resonator and the precision are 0.10024407 m and 22 nm, respectively. The intracavity resonance laser wavelength of the optical resonator is measured, and it is obtained that the cavity length of the optical resonator and the precision are 0.1002440884 m and 0.21 nm, respectively. The accuracy is improved by two orders of magnitude. The proposed method is expected to promote the development of basic physics research, physical properties precision measurement of materials, fiber sensing and so on.

Key words measurement; narrow linewidth laser; precision measurement of length; resonance interference; free spectral range; optical resonator

OCIS codes 120.2230; 140.3425; 120.3180; 120.3940; 310.6088

收稿日期: 2016-07-06; 收到修改稿日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(61127901)、国家自然科学基金(11273024, 61025023)、国家自然科学基金青年科学基金(11403031)、中组部“青年拔尖人才支持计划”项目(组厅字[2013]33号)、中科院科技创新“交叉与合作团队”项目(中科院人教字(2012)119号)、中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-W02)

作者简介: 焦东东(1989—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事 1550 nm 窄线宽激光器方面的研究。E-mail: jandan19@sina.com

* 通信联系人。E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

1 引言

近年来随着科技、工业等领域的飞速发展,长度精密测量对现代先进制造工业如仪器制造、精密加工制造、高精度装配等^[1-2]起着至关重要的作用。在长度精密测量领域,激光以其较好的方向性、单色性、相干性,以及受环境因素影响小等特点而得到广泛应用^[3-7]。目前,常用的激光长度测量方法主要有脉冲飞行时间法、相位激光法、光学干涉法及光学频率梳法。脉冲飞行时间法最早应用于激光长度测量领域,测量范围大,但测量精度与波长同一量级^[8],限制了其应用范围^[9]。相位激光法是一种绝对长度测量方法,测量精度可达微米量级^[10-11],但测试精度受到调制频率和鉴相精度的影响,存在模糊距离,需要采用多频率调制的办法来扩展测量范围,从而使其测量精度减小,测量复杂性增加^[12]。光学干涉法是最经典、也是最常用的长度测量方法,其测量精度在 10^{-7} 米量级^[13],但在测量过程中需要不断移动测量目标,无法获得真实的距离信息^[14]。采用光学频率梳对长度进行测量是近年来最常用的一种测量方法,测量精度在纳米量级,使激光长度测量技术得到了显著提高^[15-16],但光学频率梳对工作环境的要求非常严苛,成本相当高。

光学谐振腔腔长的精密测量在许多领域有着重要的应用。在基础物理研究领域,光学谐振腔有效腔长的精密测量和控制对研究光与场的相互作用有着极其重要的作用^[17]。通常由光纤 Bragg 光栅法布里-珀罗(F-P)腔构成传感系统,在振动、静态应力和温度等传感方面有着较好的应用,F-P腔的腔长是整个传感系统的关键部分,因此 F-P腔腔长的精密测量对提高由 F-P腔构成的传感系统的灵敏度有重要作用^[18-21]。

针对高精度光学谐振腔腔长的精密测量,本文提出了一种利用窄线宽激光作为测量光源,对光学谐振腔自由光谱区与腔内共振激光波长进行测量而得到光学谐振腔腔长的方法。结合光学谐振腔的相关理论,推导出了光学谐振腔腔长与自由光谱区、腔内共振激光波长之间的相关公式,通过理论模拟对光学谐振腔腔长的测量条件及结果进行了分析讨论。以自行研制的线宽为 1.9 Hz、频率稳定度为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 、中心波长为 1550 nm 的窄线宽激光作为光源,对长度约 100 mm 的超低膨胀系数材料(ULE)光学谐振腔腔长进行了精密测量。对光学谐振腔自由光谱区进行测量得到的光学谐振腔腔长为 0.10022407 m,精度为 22 nm,对光学谐振腔腔内共振激光波长进行测量得到的光学谐振腔腔长为 0.1002440884 m,精度为 0.21 nm,精度相对提高了 2 个量级。对实验中限制光学谐振腔腔长的测量精度的因素进行了讨论分析,并提出了相应的解决方案。

2 基本原理

在不考虑原子跃迁谱线频率微小变化的情况下,激光振荡频率主要由光学谐振腔的谐振频率决定^[22],表示为

$$\nu(N) = N \frac{c}{2nL}, \quad (1)$$

式中 L 为光学谐振腔腔长, N 为纵模序数, n 为腔内介质折射率, c 为真空中的光速。由(1)式可得到光学谐振腔腔长为

$$L = \frac{c}{2n\Delta\nu}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu$ 为光学谐振腔的自由光谱区。对(2)式进行微分,得到光学谐振腔的相对长度变化为

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta f}{\Delta\nu} - \frac{\Delta n}{n}, \quad (3)$$

式中 Δf 为光学谐振腔自由光谱区的变化量, ΔL 为光学谐振腔腔长的变化量, Δn 为折射率的变化量。结合(2)式得到光学谐振腔腔长的绝对变化为

$$\Delta L = -\frac{2}{c}\Delta f n L^2 - \frac{\Delta n}{n}L. \quad (4)$$

在真空情况下空气折射率变化较小,对光学谐振腔腔长的绝对变化的影响忽略不计,可得到真空中光学谐振腔腔长的绝对变化为

$$\Delta L = -\frac{2}{c}\Delta f n L^2. \quad (5)$$

当光学谐振腔的绝对长度变化满足 $\Delta L < \lambda$ 时,即满足 $\sqrt{\lambda c / (2n\Delta f)} > L$ 时,可以采用激光与光学谐振腔共振干涉的原理对光学谐振腔腔长进行测量。若光学谐振腔腔长为 L' ,激光波长为 λ ,当激光与光学谐振腔产生共振时,腔内往返的每束光在腔内沿轴线往返一次的相位差为 $2j\pi$,干涉强度最强,光学谐振腔的透射信号最大。光在腔内往返一次的光程为 $2L'$,则 L' 与 λ 之间的关系可以表示为^[23]

$$2L' = j\lambda, \quad (6)$$

式中 j 为整数,可表示为 $j = \text{int}(2L/\lambda)$, $\text{int}(\cdot)$ 表示取整。对(5)式两边微分可以得到光学谐振腔腔长的绝对长度变化为

$$\Delta L' = \frac{\text{int}(2L/\lambda)}{2} \Delta \lambda. \quad (7)$$

结合(6)式与上述测量条件可知,只有在光学谐振腔腔长满足 $\sqrt{\lambda c / (2n\Delta f)} > L > \lambda/2$ 时,采用共振干涉法对光学谐振腔腔长的测量有效。从理论推导的公式可以看出,在光学谐振腔腔长、激光波长一定的情况下,光学谐振腔腔长的测量精度主要受限于光学谐振腔自由光谱区与腔内共振激光波长的测量精度。

3 理论模拟

假设光学谐振腔自由光谱区的测量精度分别为 1 Hz、1 kHz、1 MHz。光学谐振腔腔长满足 $\sqrt{\lambda c / (2n\Delta f)} > L > \lambda/2$ 时,采用共振干涉法对光学谐振腔腔长进行测量。以中心波长为 325、1550、3370 nm,波长测量精度 $\Delta \lambda$ 为 0.01 pm 的激光作为模拟测量光源,对光学谐振腔绝对长度的变化进行理论模拟及分析。

在光学谐振腔腔长满足 $\sqrt{\lambda c / (2n\Delta f)} > L > \lambda/2$,采用共振干涉法对光学谐振腔腔长进行测量时,对不同波长光源以及对应的光学谐振腔腔长测量范围进行了理论模拟,如图 1 所示,其中直线 a 、 b 、 c 分别表示当光学谐振腔自由光谱区测量精度 Δf 分别为 1 Hz、1 kHz、1 MHz,利用共振干涉法对光学谐振腔腔长进行测量时,所采用激光的波长对应光学谐振腔腔长的测量上限,直线 d 表示所采用激光的波长对应光学谐振腔腔长的测量下限。

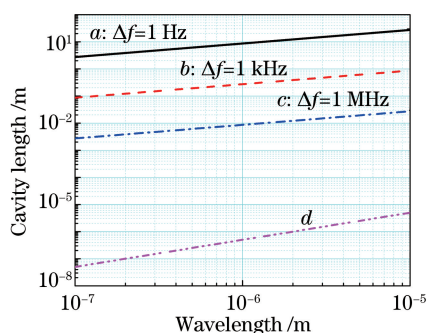


图 1 光学谐振腔腔长测量范围

Fig. 1 Measurement range of optical resonator cavity length

以中心波长为 325、1550、3370 nm,波长测量精度为 0.01 pm 的激光作为测量光源,根据(7)式对相应长度范围内光学谐振腔的绝对长度变化进行了理论模拟,如图 2 所示,图 2(a)~(c)中黑色实线表示自由光谱区精度 Δf 分别为 1 Hz、1 kHz、1 MHz 时,采用自由光谱区法得到的不同长度光学谐振腔所对应的绝对长度变化,其他三条直线分别表示在不同 Δf 条件下,用波长为 325、1550、3370 nm 的激光作为测量光源时,相应范围内不同长度的光学谐振腔所对应的绝对长度变化。由图 2 可以看出,采用中心波长相同的激光作为测量光源时,光学谐振腔腔长的绝对长度变化与自由光谱区的精度无关;光学谐振腔腔长的测量范围随 Δf 的增加而减小;测量激光光源的波长越长,光学谐振腔绝对长度变化的测量精度越低。

从上述模拟仿真结果可以看出,采用共振干涉法对光学谐振腔腔长进行测量时,其测量精度主要受限于测量激光光源波长的精度。在一定条件下对光学谐振腔腔长进行精密测量时,可结合自由光谱区法与共振干涉法各自的优势,找出最佳的测量方法。

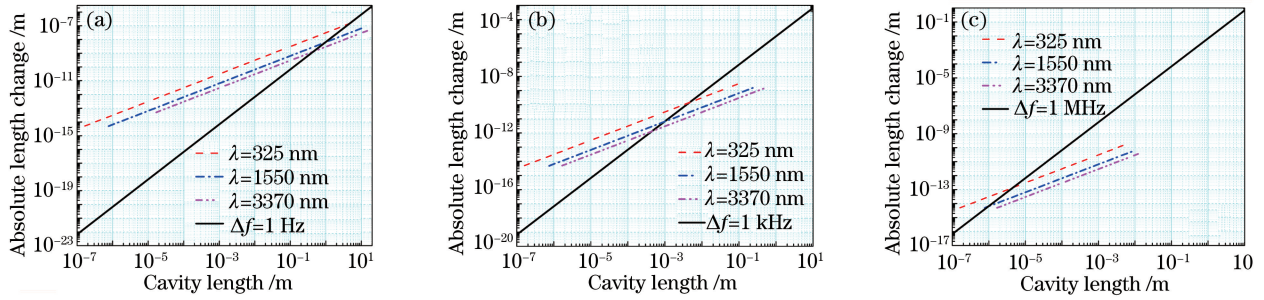


图 2 光学谐振腔的绝对长度变化

Fig. 2 Absolute length change of optical resonator

4 实验过程及分析

实验装置如图 3 所示,以自行研制的线宽约 1.9 Hz、频率不稳定性为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 、中心波长为 1550 nm 的窄线宽激光器的输出作为测量光源^[24]。待测光学谐振腔(CAV2)的腔长约为 100 mm,精细度约 300000,材料具有超低膨胀系数(ULE, Ultra-Low Expansion)。待测光学谐振腔放置在真空度约为 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 的真空腔室中,计算得到空气折射率约为 1,折射率变化量在 10^{-17} 量级^[25]。通过有限元分析得到待测光学谐振腔最佳支撑点处的震动敏感度约为 $2 \times 10^{-11} \text{ g}^{-1}$ 。待测光学谐振腔(CAV2)及相关的测量装置位于光学面包板上,未做主动隔振及控温。射频驱动信号源(RF)以氢原子钟的输出频率为参考,频率不稳定性为 $1 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$,与世界协调时(UTC 时间)的最大误差约 10^{-10} Hz/s 。波长计(WS7)内置校准源,绝对测量精度为 60 MHz($4.8 \times 10^{-5} \text{ nm}$),测量分辨率 10 MHz($8 \times 10^{-6} \text{ nm}$)。

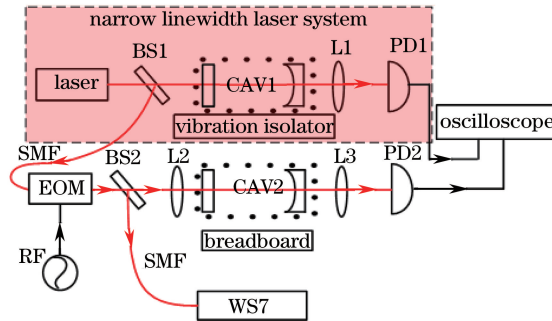


图 3 光学谐振腔腔长测量原理图

Fig. 3 Schematic of optical resonator cavity length measurement

实验时使 1550 nm 窄线宽激光器的压电陶瓷(PZT)处于扫描状态,将窄线宽激光器的输出光经光束分离器(BS1)分为 2 束,一束进入光学参考腔(CAV1),透射光经透镜(L1)聚焦后进入探测器(PD1),探测到的透射光信号输入到示波器上进行监测;另一束经单模光纤(SMF)进入电光调制器(EOM,调节范围为 20 GHz),调制后产生 2 个对称的边带,再经过分束器(BS2)分为 2 束,一束光经单模光纤进入波长计 WS7,对进入待测光学谐振腔(CAV2)的激光波长进行监测,另一束光经过匹配透镜(L2)后进入 CAV2,透射光经透镜(L3)聚焦之后进入探测器(PD2),探测到的透射光信号输入到示波器上进行监测。调节 EOM 的 RF 输出信号的功率,在不大于 EOM 射频信号输入功率的情况下,使 CAV2 透射峰横电基模(TEM_{00})的边带达到最大值后,调节 RF 的输出频率,使示波器上 CAV2 透射峰 TEM_{00} 其中一个边带与 CAV1 透射峰 TEM_{00} 的位置基本重合,如图 4 所示,其中黑线表示 CAV2 透射峰 TEM_{00} 与其 2 个边带的透射峰信号。为方便对比,对 CAV2 透射光信号加了 50 mV 偏置,红线表示 CAV1 透射峰 TEM_{00} 信号。将窄线宽激光器进行锁定,此时进入 CAV2 内的部分激光与光学谐振腔基本产生共振,但未达到光学谐振腔的最佳共振点,再细调 RF 的输出频率,使 CAV2 的透射峰达到最大值时,记录 EOM 的 RF 输出频率及波长计测量到的激光波长。EOM 产生的 2 个边带可看作是对激光进行移频产生的,为方便表示,将 CAV2 透射峰 TEM_{00} 的 2 个边带中与光学谐振腔共振的边带看作是光学谐振腔的纵模。

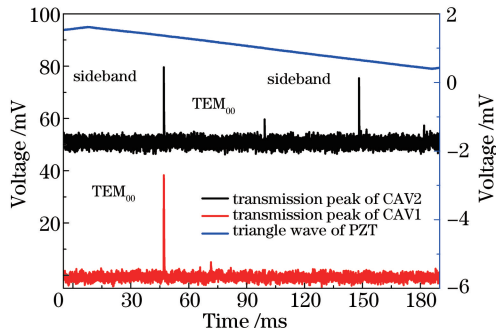


图 4 CAV1 与 CAV2 透射峰

Fig. 4 Transmission peaks of CAV1 and CAV2

采用相同的方式,在窄线宽激光器系统锁定的条件下,以 CAV1 的 TEM_{00} 透射峰信号为基准,连续调节 EOM 的 RF 输出频率,使 CAV2 的透射峰达到最高点时,记录 RF 输出频率与波长计测得的激光波长,测量结果如表 1 所示。在测量过程中,所取光学谐振腔的模式数是从中间某一段截取的,假设模式数 N 从 $M+1$ (M 为整数)开始,如表 1 中第 1 列所示。对实验进行了 5 组重复性测量,每组测量大约 5 min,每组时间间隔约 0.5~2 h 不等,RF 的输出频率如表 1 中第 2 列 A、B、C、D、E 所示,波长计的输出波长如表 1 中最后一列所示。由于振动、腔精细度等因素的影响,实验观测到的测量精度只能达到百赫兹量级。温度的变化使窄线宽激光器的锁定点及 CAV2 共振点发生改变,导致不同时间段的测量结果相差较大。

表 1 5 个时间段内 CAV2 不同模式数对应的 RF 输出频率及波长计测得的激光波长

Table 1 RF output frequency corresponding to different mode numbers of CAV2 in five time periods and laser wavelength measured by wavemeter

Mode number N	Output frequency of RF /GHz					Wavelength /nm
	A	B	C	D	E	
$M+1$	0.4860216	0.4860260	0.4860428	0.4860436	0.4860448	1550.21826
$M+2$	1.9823692	1.9823734	1.9823903	1.9823910	1.9823927	1550.20627
$M+3$	3.4787177	3.4787222	3.4787382	3.4787388	3.4787402	1550.19428
$M+4$	4.9750660	4.9750701	4.9750867	4.9750875	4.9750888	1550.18230
$M+5$	6.4714139	6.4714180	6.4714345	6.4714354	6.4714368	1550.17031
$M+6$	7.9677618	7.9677656	7.9677820	7.9677827	7.9677842	1550.15832

将表 1 中每相邻 2 个纵模对应的 RF 输出频率相减,可得到 CAV2 的自由光谱区,如表 2 中第 2 列 A、B、C、D、E 所示,表 2 中第 3 列表示光学谐振腔在同一模式时所对应的自由光谱区的平均结果,第 4 列是通过方差公式计算得到的不同模式时光学谐振腔自由光谱区的精度。最后两列分别表示由(2)、(5)式计算得到 CAV2 的腔长及误差,不同模式下的腔长及误差的测量结果如图 5 所示。由于真空腔中空气折射率误差在 10^{-17} 量级,由理论分析可知,激光线宽为 1 Hz,腔长为 10 cm,光学谐振腔腔长测量误差在 10^{-10} 量级,远大于折射率的变化量(10^{-17} 量级),实验测量中认为真空腔中空气折射率 $n=1$ 。

表 2 待测光学谐振腔自由光谱区测量

Table 2 Free spectral range measurement of optical resonant cavity to be detected

Mode number N	Free spectral range /GHz					Free spectral range /GHz	Accuracy of free spectral range /Hz	Absolute cavity length L/m	Error /nm
	A	B	C	D	E				
$M+1$	1.4963476	1.4963474	1.4963475	1.4963474	1.4963479	1.4963480	185	0.10024409	12
$M+2$	1.4963485	1.4963488	1.4963479	1.4963478	1.4963475	1.4963479	554	0.10024405	37
$M+3$	1.4963483	1.4963479	1.4963485	1.4963487	1.4963486	1.4963478	334	0.10024403	22
$M+4$	1.4963479	1.4963479	1.4963478	1.4963479	1.4963480	1.4963478	63	0.10024406	4
$M+5$	1.4963479	1.4963476	1.4963475	1.4963473	1.4963474	1.4963478	178	0.10024409	12

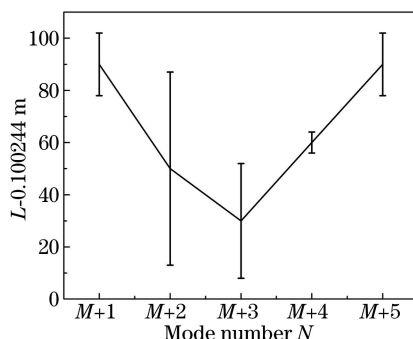


图 5 采用自由光谱区法时不同模式数对应的腔长及误差

Fig. 5 Cavity length and error corresponding to different mode numbers by measuring the free spectral range

利用方差公式对不同模式所对应的光学谐振腔腔长进行处理,得到光学谐振腔腔长为0.10024407 m,标准误差为 22 nm。实验中由于振动、声音、光纤噪声、观测误差等因素的影响,CAV2 的自由光谱区测量精度只能达到百赫兹量级。为了得到更高精度的光学谐振腔腔长,后续工作中考虑对待测光学谐振腔进行控温、隔振处理。

由上述分析可知,采用自由光谱区法测量得到的 CAV2 腔长及精度满足 $\sqrt{\lambda c / (2n\Delta f)} > L > \lambda / 2$ 。利用共振干涉法对 CAV2 的腔长再次进行测量,实验装置如图 3 所示,在利用自由光谱区法对光学谐振腔腔长进行测量的同时,利用波长计对进入 CAV2 内并产生共振的激光波长进行测量,测量结果如表 1 第 3 列、表 3 第 2 列所示。取 CAV2 腔长 $L = 0.10024407$ m,根据(6)式可得到当光学谐振腔与腔内激光共振时激光在腔内往返一次所含的激光波长数目 j ,如表 3 第 3 列所示。表 3 第 4 列为根据(5)式得到的 CAV2 腔长 L' 。由于波长计具有一定的测量误差,利用偏差公式对不同模式下的 L' 进行了处理,得到不同模式对应的腔长误差 $\Delta L'$,如表 3 第 5 列所示。利用方差公式对不同模式的光学谐振腔腔长进行处理,最终得到的光学谐振腔腔长为 0.1002440884 m,标准误差为 0.21 nm。测量精度相对自由光谱区法提高了 2 个量级,不同模式对应的光学谐振腔腔长及其误差如图 6 所示。

表 3 待测光学谐振腔腔长修正

Table 3 Cavity length correction of optical resonator cavity to be detected

N	λ /nm	j	L' /m	$\Delta L'$ /nm
M+1	1550.21826	129329	0.1002440887	0.3
M+2	1550.20627	129330	0.1002440884	0.0
M+3	1550.19428	129331	0.1002440882	0.2
M+4	1550.18230	129332	0.1002440886	0.2
M+5	1550.17031	129333	0.1002440884	0.0
M+6	1550.15832	129334	0.1002440881	0.3

对 CAV2 内共振激光波长与对应的不同模式数的关系进行了拟合,拟合公式为 $\lambda = [1550.23025 - 0.0119(N - M)] \times 10^{-9}$ nm,拟合曲线如图 7 所示,从图中可以看出线性拟合度比较理想,这是由于波长计的测量精度远远大于测量光源波长的抖动误差。因此,可通过对进入光学谐振腔腔内激光波长的更精确测量,进一步提高光学谐振腔腔长的测量精度。

目前由于待测光学谐振腔精细度与透射信号信噪比的限制,光学谐振腔透射信号峰顶的测量存在较大误差,影响了腔长的测量精度,同时待测光学谐振腔未进行隔音、隔振处理,也未进行控温,这导致光学谐振腔自由光谱区的测量精度只能达到百赫兹量级,腔长测量精度达到 22 nm。由于所使用波长计测量精度的限制,光学谐振腔腔长的测量精度只能提高 2 个量级,精度达到 0.21 nm。后续工作可对待测光学谐振腔进行隔振、控温处理,使待测光学谐振腔腔长的测量精度进一步提高,并对光学谐振腔腔内共振激光的波长进行更精密的测量,来提高光学谐振腔腔长的测量精度,使长度为 1 m 的光学谐振腔腔长测量精度提高至飞米量级。

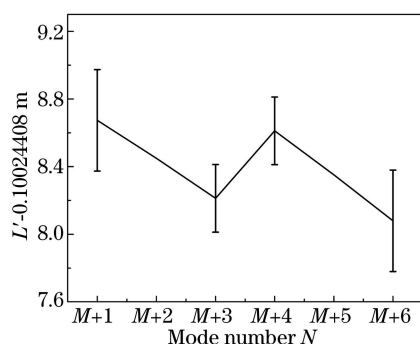


图 6 利用共振干涉法时不同模式数对应的腔长及误差

Fig. 6 Cavity length and error corresponding to different mode numbers by resonance interference method

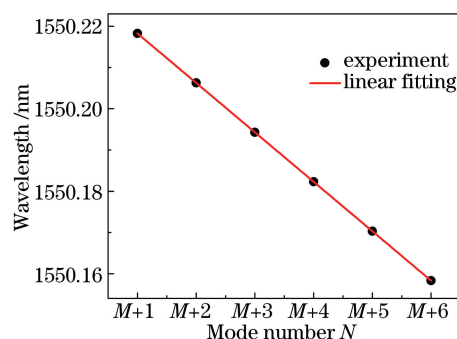


图 7 光学谐振腔内模式数对应的波长

Fig. 7 Wavelengths corresponding to mode numbers in optical resonator

5 结 论

提出了一种利用窄线宽激光作为测量光源,对光学谐振腔自由光谱区与腔内共振激光波长进行测量而得到光学谐振腔腔长的方法。从理论推导、模拟和实验 3 个方面对光学谐振腔腔长的测量方法、测量条件及测量精度进行了详细的讨论分析。实验中,通过对长度约 100 mm 的光学谐振腔自由光谱区进行精密测量,计算得到光学谐振腔腔长为 0.10024407 m,精度为 22 nm;对光学谐振腔腔内共振激光波长进行精密测量,计算得到光学谐振腔腔长为 0.1002440884 m,精度为 0.21 nm,精度相对提高 2 个量级。对影响光学谐振腔腔长测量精度的因素进行了分析,并提出了相应的改进方案。提出的测量方法及实验结果对基础物理研究、材料特性测量及由 F-P 腔构成的光纤传感等领域有一定的促进作用。

参 考 文 献

- [1] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, *et al.* Large-scale metrology-an update[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 587-609.
- [2] Pritchard M E, Simons M. A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes [J]. Nature, 2002, 418(6894): 167-171.
- [3] Cui M, Zetitouny M G, Bhattacharya N, *et al.* Long distance measurement with femtosecond pulses using a dispersive interferometer[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6549-6562.
- [4] Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5954-5960.
- [5] Meng Fei, Cao Shiyong, Cai Yue, *et al.* Study of the femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 100601.
孟 飞, 曹士英, 蔡 岳, 等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 100601.
- [6] Xing Shujian, Zhang Fumin, Cao Shiyong, *et al.* Arbitrary and absolute length measurement based on femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17): 170603.
邢书剑, 张福民, 曹士英, 等. 飞秒光频梳的任意长绝对测距[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 170603.
- [7] Fang Zhanjun, Wang Qiang, Wang Minming, *et al.* Femtosecond frequency comb and optical frequency measurement of 532 nm Nd:YAG laser[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5684-5690.
方占军, 王 强, 王民明, 等. 飞秒光梳和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5684-5690.
- [8] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe[J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [9] Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Analysis of an innovative method for large-scale high-precision absolute distance measurement based on multi-heterodyne interference of dual optical frequency combs[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(7): 070601.
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 一种双光梳多外差大尺寸高精度绝对测距新方法的理论分析[J]. 物理学报, 2013, 62

- (7): 070601.
- [10] Liu Miao, Yang Xueyou, Liu Changjie. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208004.
刘 邈, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距方法与系统实现[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208004.
- [11] Fujima I, Iwasaki S, Seta K. High-resolution distance meter using optical intensity modulation at 28 GHz [J]. Measurement Science & Technology, 1998, 9(7): 1049-1052.
- [12] Wang Ju. Research on key techniques in ultra-large capacity multiple wavelength all-optical regeneration and in OEO based high-precision absolute distance measurements over a long range[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 22.
王 菊. 超大容量多波长全光再生与基于 OEO 的大量程、高精度绝对距离测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 22.
- [13] Zhang Tao, Zhu Jigui, Guo Tinghang, *et al.* Effect of fiber length on distance measurement based on optoelectronic oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908003.
张 涛, 郑继贵, 郭挺航, 等. 光纤长度对基于光电振荡器距离测量的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908003.
- [14] Stone J A, Stejskal A, Howard L. Absolute interferometry with a 670 nm external cavity diode laser[J]. Applied Optics, 1999, 38(28): 5981-5994.
- [15] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [16] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, *et al.* Long distance measurement with femtosecond pulses using a dispersive interferometer[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6549-6552.
- [17] Du Jinjin, Li Wenfang, Wen Ruijuan, *et al.* Precision measurement of resonant frequency and the effective cavity length of the high finesse optical micro-cavity[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 194203.
杜金锦, 李文芳, 文瑞娟, 等. 超高精细度微光学腔共振频率及有效腔长的精密测量[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 194203.
- [18] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Perot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3798-3806.
- [19] Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling, *et al.* SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 631-635.
饶云江, 周昌学, 冉曾令, 等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 631-635.
- [20] Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.* Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406006.
张 乐, 吴 波, 叶 雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406006.
- [21] Niu Siliang, Rao Wei, Liang Xun, *et al.* Visibility analysis of interferometric fiber Bragg grating defined Fabry-Perot sensor system under Gaussian profile approximation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 39(3): 0305006.
牛嗣亮, 饶 伟, 梁 迅, 等. 采用高斯波形近似的干涉型光纤光栅法布里-珀罗传感系统的可见度分析[J]. 光学学报, 2012, 39(3): 0305006.
- [22] Lan Xinju. Laser technique[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 224.
蓝信钜. 激光技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009: 224.
- [23] Yao Qijun. Optical tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 350.
姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 350.
- [24] Jiao Dongdong, Gao Jing, Liu Jie, *et al.* Development and application of communication band narrow linewidth lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(19): 190601.
焦东东, 高 静, 刘 杰, 等. 用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用[J]. 物理学报, 2015, 64(19): 190601.
- [25] Jiang Yanyi. Narrow line width lasers: Application to optical clocks[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012: 61-67.
蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2012: 61-67.