

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-03-0169-06

基于光学谐振腔的可调谐滤波器特性研究

项晓^{1,2,3}, 侯飞雁^{1,2,3}, 权润爱^{1,2,3}, 董瑞芳^{1,2,3}, 刘涛^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要: 光学谐振腔作为激光科学领域一个重要的器件, 广泛应用于非线性光学、量子光学及光频标等方面。在这些应用中, 光学谐振腔可以被用作一个低通滤波器过滤激光噪声或者带通滤波器来选取特定的光谱成分。基于谐振腔次共振的机理, 提出了一种应用于飞秒脉冲激光的可调谐滤波器的实现方案, 并在实验上对其滤波特性进行了研究。采用 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术将腔长锁定到了主共振峰及 3 个不同的次共振峰上, 分别测量了不同透射峰的相对强度噪声及共振光谱特性。实验结果表明, 通过锁定共振腔长到不同的共振峰, 谐振腔对输入激光弛豫振荡峰的抑制能力可从 16.1 dB 减小为 11.5 dB; 相应的 3 dB 光谱滤波带宽可由全通变窄至 2.30 nm。基于光学谐振腔的可调谐滤波器的实现将进一步拓展光学谐振腔在飞秒激光领域的应用范围。

关键词: 飞秒激光; 光学谐振腔; 可调谐滤波器; 强度噪声

Characterization of a tunable optical filter based on a passive cavity for femtosecond lasers

XIANG Xiao^{1,2,3}, HOU Fei-yan^{1,2,3}, QUAN Run-ai^{1,2,3}, DONG Rui-fang^{1,2,3},

LIU Tao^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The optical cavity has been recognized as a basic and important element in areas of laser science, such as nonlinear optics, quantum optics, and optical frequency standards. Among these applications, the optical cavity can be used as a low-pass filter for laser noise or band-pass filter to select specific spectral component. Based on the mechanism of cavity secondary resonance, a tunable hybrid optical filter combined low-pass noise and band-pass spectral filtering for femtosecond lasers was proposed and its filtering characteristics were studied

收稿日期: 2020-01-23; 接受日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61875205; 91836301; 61801458); 中组部“青年拔尖人才”支持计划资助项目 (中组字 [2013] 33 号); 中国科学院前沿科学重点研究资助项目 (QYZDB-SSWSLH007); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”B 类资助项目 (XAB2019B15; XAB2019B17); 中国科学院战略性先导科技专项 C 类资助项目 (XDC07020200)

作者简介: 项晓, 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事量子时间同步技术研究。

experimentally. Here, the cavity was stabilized in one main and three secondary resonance peaks with the Pound-Drever-Hall (PDH) technique and then the relative intensity noise (RIN) and optical spectra were recorded and analyzed. The experimental results show that, the tunability of the cavity-based filter can be identified by their different attenuations, which vary from 16.1 dB to 11.5 dB, of the relaxation oscillation peak in the laser RIN, along with the 3 dB bandwidths of the spectral filter tuning from all-pass to 2.30 nm under different resonance conditions. The realization of the cavity-based tunable optical filter would help to find more applications in fields with femtosecond lasers.

Key words: femtosecond laser; optical cavity; tunable optical filter; relative intensity noise

0 引言

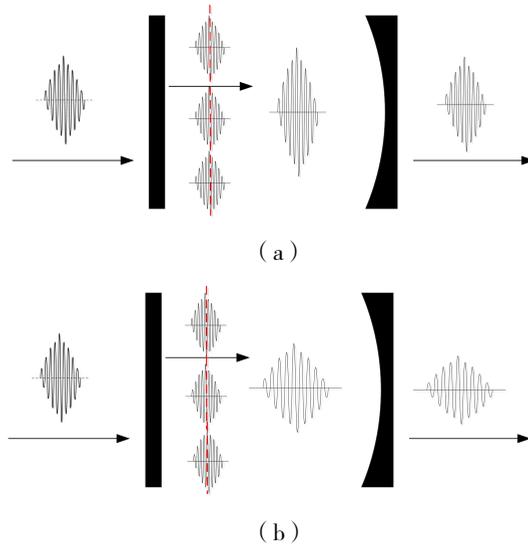
光学谐振腔^[1-2]是通过将激光束束缚在一定的空间范围内,使得腔内多次往返的光束之间产生干涉效应。光学谐振腔已发展成为激光科学领域不可或缺的器件,广泛应用于激光稳频^[3-4]、腔增强吸收光谱^[5]、引力波探测等方面^[6]。在这些应用中,光学谐振腔可被用作一个低通滤波器^[7-8],用以过滤激光的高频强度或者相位噪声,其 3-dB 截止频率即为光学谐振腔的线宽 $\Delta\nu$ 可表示如下:

$$\Delta\nu = \frac{c}{FL}, \quad (1)$$

式(1)中, c 是光速, F 是谐振腔的精细度^[9], L 为谐振腔的长度。在不考虑镜片的散射、吸收等损耗时,精细度 F 由腔镜的反射率 R 决定。腔线宽越窄对应腔性能越好,但是过窄的线宽对反馈控制系统的性能、环境噪声隔离及腔镜镀膜损伤阈值也提出了更高的要求。因此,不同的应用场景要求谐振腔具有不同的线宽,例如激光稳频系统中常采用窄线宽(\sim kHz)的谐振腔作为频率参考,而用作激光空间模式过滤的谐振腔线宽在 MHz 级别即可。基于以上考虑,如果能对谐振腔的线宽进行调谐,将使一个谐振腔同时满足多种实验系统的要求,实现一腔多用。

由上述 $\Delta\nu$ 的表达式可知,如果要想实现滤波器截止频率的可调谐性,我们需要改变谐振腔的长度 L 或者镜片的反射率 R 。对于腔长 L 较大的情况,通过 L 的变化来实现滤波器截止频率的调节意味着要改变谐振腔的结构,需要重新对谐振腔及腔光模式匹配光路进行设计;调整镜片的反射率 R 则要求更换镜片重新调节光路或者增加额外的损耗。总体而言,以上方案均无法在不改变谐振腔或光路结构的条件下对谐振腔的线宽进行调节,可操作性较差。

值得注意的是,当光学谐振腔应用于飞秒激光脉冲^[10-11]时,激光脉冲在腔内更为苛刻的共振条件为滤波器截止频率的可调谐性提供了可能。与连续光不同的是,脉冲重复频率与谐振腔腔长的相互匹配是激光脉冲在谐振腔内共振的前提^[12]。具体而言,当谐振腔的腔长与激光脉冲的重复频率完全匹配时,如图 1(a)所示,腔内传输一周以后的脉冲与新进入谐振腔的脉冲在时间上重合,此时达到最佳的共振效果(主共振);若腔长与激光脉冲的重复频率之间出现失配则会导致腔内多次反射的脉冲只有部分时间重合,如图 1(b)所示,在腔长偏离最佳共振位置若干个激光中心波长处会产生次共振。与主共振相比,次共振等效于增加了一个与腔内脉冲重合时间相关的损耗,而这种损耗的可调节性可通过对腔长的精细控制来实现。当激光脉冲在腔内共振时,腔长的失谐量越大腔内损耗越大,从而导致谐振腔的精细度越低,相应的腔线宽也越大。因此,基于次共振的机理,光学谐振腔可以充当一个截止频率(线宽)可调谐的低通滤波器,用以过滤激光的噪声。



注：(a) 腔长与脉冲重复频率完全匹配，腔内传输一周以后的脉冲与新入腔的脉冲在时间上重合；

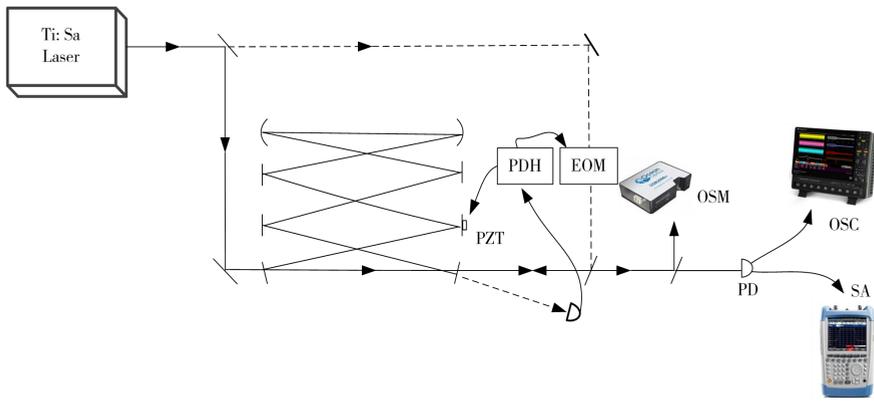
(b) 腔长与脉冲重复频率之间出现失配导致腔内多次反射的脉冲部分时间重合

图 1 激光脉冲在光学谐振腔内传输示意图

基于上述分析，我们在实验上搭建了一个精细度约为 800、腔长 4 m（自由光谱区为 75 MHz）的八镜环形光学谐振腔^[13]，采用 Pound-Drever-Hall（PDH）稳频技术^[14]将其共振腔长锁定到主共振峰及 3 个不同的次共振峰上，分析比较了不同透射峰的相对强度噪声（relative intensity noise, RIN）^[15]及共振光谱特性。本文主要内容安排如下：第 1 部分对实验装置进行了描述；第 2 部分为 3 小节，分别对腔长锁定效果、强度噪声及共振光谱特性进行了分析讨论；第 3 部分是对全文的总结。

1 实验装置

基于光学谐振腔的可调谐滤波器特性研究实验装置如图 2 所示，所用钛宝石锁模激光器（femtolasers, fusion）中心波长 815 nm，带宽约 6 nm，脉冲宽度约 130 fs，重复频率 75 MHz。钛宝石锁模激光器输出的飞秒脉冲激光经过透镜组（图中未显示）模式匹配后进入八镜环形光学谐振腔。该谐振腔为蝴蝶结形结构，腔长设置为 4 m，对应的自由光谱区正好与飞秒脉冲激光的重复频率相等以满足脉冲共振条件。除输入输出耦合镜具有相同的反射率 99.75%以外，其他 6 个镜子均为反射率大于 99.95%的高反镜，同时八个腔镜均采用低色散镀膜，以减小内腔色散对共振光谱带宽的影响。为实现共振腔长的锁定，我们采用典型的 PDH 稳频技术，用分束器将飞秒脉冲激光分出小部分（图中虚线所示）经电光调制器（EOM, Newfocus 4062）调制产生 17.16 MHz 的边带信号后反向注入到谐振腔内用以产生误差信号。误差信号经过反馈系统作用于其中一个腔镜上的压电陶瓷驱动器（PZT），以实现腔长的锁定。得益于环形腔内光束传播的特点：反向注入光束与正向光束独立传输，而反向注入的优点在于不会给正向探测光路中加入额外的色散元件以及调制信号，避免了色散对飞秒脉冲的展宽以及调制信号对测量结果的影响^[11]。在光学谐振腔的输出端放置一个光电探测器（PD, Thorlabs PDA 36A）接收光信号，用示波器（OSC, Teledyne LeCroy HDO4104）对透射信号进行监视、频谱分析仪（SA, Rohde&Schwarz FSH4）对其相对强度噪声进行测量；使用光谱分析仪（OSM, Ocean optics USB2000+）对共振光谱特性进行测量。



注: Ti: Sa Laser 为钛宝石锁模激光器; PDH 为 Pound-Drever-Hall 稳频电路; EOM 为电光调制器; PZT 为压电陶瓷; OSM 为光谱分析仪; PD 为光电探测器; OSC 为示波器; SA 为频谱分析仪

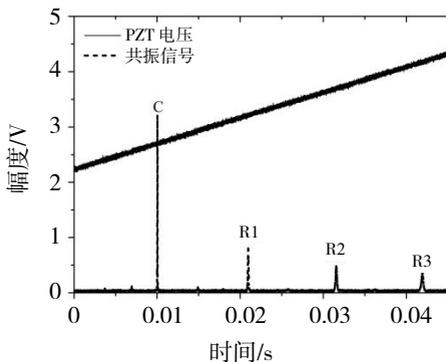
图 2 基于光学谐振腔的可调谐滤波器特性研究实验装置图

2 实验结果与分析

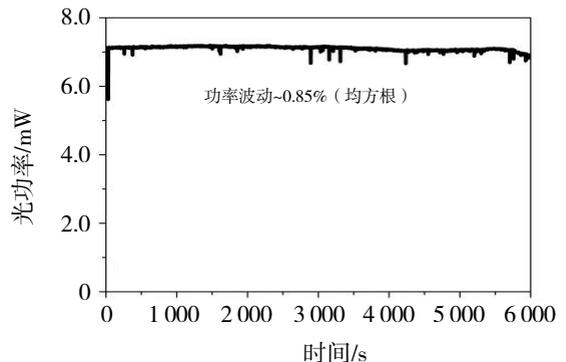
本节分别对谐振腔的腔长锁定、强度噪声及共振光谱特性测量与分析进行了讨论。

2.1 腔长锁定

钛宝石锁模激光器输出的飞秒脉冲激光耦合进谐振腔之后,通过高压放大器给 PZT 加载周期性的三角波信号,即对腔长进行周期调制。当腔长满足脉冲共振条件时,就会在示波器上观察到一个共振峰,如图 3(a)所示:中间强度最大的峰是主共振峰,随着腔长偏离中心位置,主共振峰左右两侧会出现强度依次减小、时间宽度依次增大的次共振峰。为了实现对共振峰与次共振峰噪声特性及光谱特性的测量,需要采用上述的 PDH 稳频技术对谐振腔的腔长进行锁定。在实验中我们可将谐振腔的腔长锁定到不同共振峰(C, R1, R2, R3)的顶端,锁定时长及稳定性可满足后续测试要求。其中腔长锁定到了主共振峰 C 上时,测得 PDH 锁腔的控制带宽约为 11 kHz(主要受限于锁定所用 PZT 的响应速度),光功率的长期稳定性情况如图 3(b)所示:在 6 000 s 的测量时间内,光功率波动为 0.85%(均方根)。



(a) 腔扫描状态下的共振信号



(b) 锁定到主共振峰上腔透射光功率的长期稳定性

图 3 示波器采集到的共振信号

2.2 强度噪声

本文对谐振腔的强度噪声过滤特性进行了分析。首先,我们对共振腔长锁定到不同的共振峰上时的强度噪声进行了测量。为了定量比较不同共振状态下谐振腔的噪声过滤特性,我们调整进入谐振腔的激光功率,以保证共振腔长锁定到不同的共振峰处谐振腔输出具有相同的光功率(3 mW)。通过频谱分析仪测量

到的相对强度噪声谱如图 4 所示：钛宝石锁模激光器输出的飞秒脉冲激光在分析频率约 1.2 MHz 处可观察到明显的弛豫振荡峰^[15]，经过谐振腔过滤以后，弛豫振荡峰的幅度得到抑制。正如上述分析可知，主共振损耗最小、线宽最窄、噪声过滤效果最好，对输入激光的弛豫振荡噪声抑制达到 16.1 dB；随着共振腔长的偏离，由于腔内多次反射的脉冲之间的时间不重合引入的损耗增大，对噪声的抑制效果减弱，依次减小为 14.8 dB (R1)，12.2 dB (R2)，11.5 dB (R3)。实验结果表明对于脉冲激光而言，通过谐振腔长度的细微改变可实现不同的噪声过滤效果，其可调谐范围主要受限于 PZT 的行程。

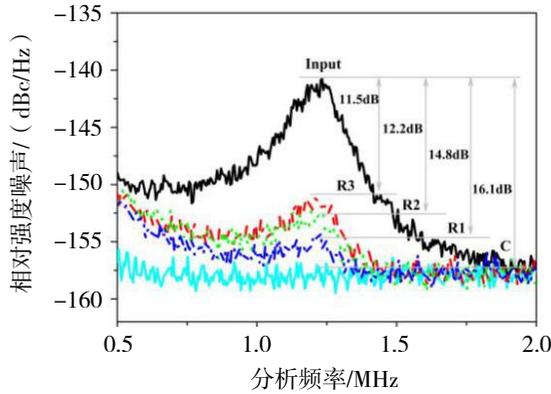
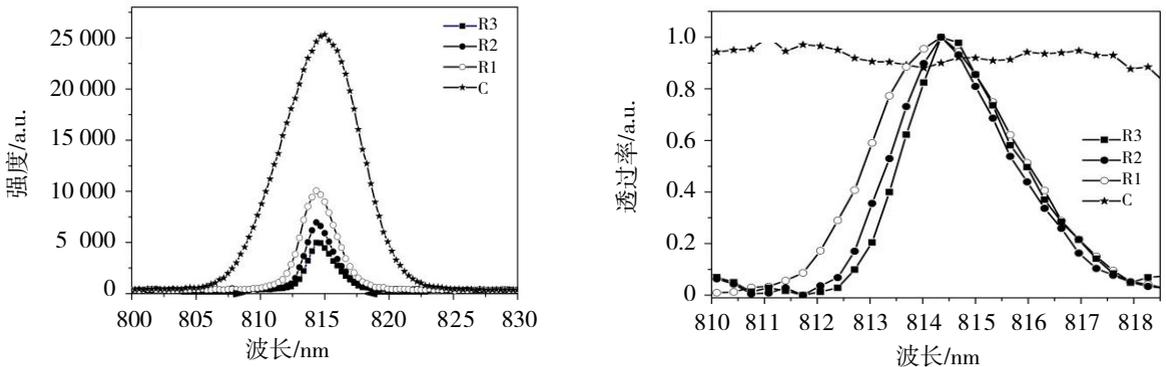


图 4 共振腔长锁定到不同的共振峰处，光功率为 3 mW 时测量到相对强度噪声谱

2.3 共振光谱

相比于主共振，次共振状态下伴随着更多的内腔损耗，除了对噪声的过滤能力随之减弱以外，也意味着更少的光谱成分参与共振。我们通过光谱分析仪对不同共振峰处的谐振腔透射光谱进行了测量，光谱如图 5 (a) 所示，主共振峰 (C) 处的光谱最宽，随着共振腔长偏离最佳位置越远，光谱强度逐渐下降，光谱宽度也依次减小。为了直观地比较不同共振状态下谐振腔对光谱的过滤效果，我们考虑输入光谱的形状后给出不同共振峰处归一化的光谱透过率曲线如图 5 (b) 所示。从图 5 (b) 中可以清楚地看出，主共振光谱透过率曲线在较宽的光谱范围 (810~818 nm) 内趋于平坦，说明该波长范围内的光谱全部共振 (对应滤波器带宽为全通)，得益于腔内使用的低色散镜片及不引入额外色散的反向注入锁定光路。我们改进了 T. J. Hammond 等人提出的色散测量方法，通过引入自动扫描光栅单色仪对该八镜谐振腔的色散实现了快速测量^[13]，结果表明其在常温常压下的二阶色散值为 28.8 fs²，与镜片厂商提供的数值接近。而次共振峰 (R1, R2, R3) 处的光谱透过率曲线在相同的光谱范围内则呈现高斯形，意味着只有中心波长附近部分光谱成分参与了共振。通过高斯拟合可知 R1, R2, R3 对应的曲线半高宽分别为 3.13, 2.46 和 2.30 nm。



(a) 共振光谱

(b) 归一化的光谱透过率曲线

图 5 共振腔长锁定到不同的共振峰处的光谱

3 结语

本文对基于光学谐振腔的可调谐滤波器的噪声及光谱过滤特性进行了研究。采用 PDH 稳频技术将谐振腔的腔长锁定到了主共振峰及 3 个不同的次共振峰上, 分析比较了不同共振峰的相对强度噪声及共振光谱特性。实验结果表明, 主共振峰处的噪声过滤效果最好, 对输入激光的弛豫振荡峰的抑制度达到 16.1 dB; 同时共振光谱也最宽, 光谱透过率曲线在 810~818 nm 范围内趋于平坦。随着腔长偏离至次共振位置, 谐振腔对噪声的过滤效果减弱, 在实验所测量的次共振位置对输入激光的弛豫振荡峰的抑制水平减小为 11.5 dB, 光谱透过率曲线的半高宽减小为 2.30 nm。本文验证了基于光学谐振腔的可调谐滤波器的可行性, 将进一步拓展光学谐振腔在飞秒激光及相关领域的应用。

参考文献:

- [1] HODGSON N, WEBER H. Laser Resonators and Beam Propagation[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [2] MAGNI V. Multielement stable resonators containing a variable lens[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(10): 1962–1969.
- [3] SCHOOF A, J GRÜNERT, RITTER S, et al. Reducing the linewidth of a diode laser below 30 Hz by stabilization to a reference cavity with a finesse above 105[J]. Optics Letters, 2001, 26(20): 1562–1564.
- [4] NOTCUTT M, MA L, YE J, et al. Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1815–1817.
- [5] LANGRIDGE J M, LAURILA T, WATT R S, et al. Cavity enhanced absorption spectroscopy of multiple trace gas species using a supercontinuum radiation source[J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10178.
- [6] WILLKE B, UEHARA N, GUSTAFSON E K, et al. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd: YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. Optics Letters, 1998, 23(21): 1704–1706.
- [7] HALD J, RUSEVA V. Efficient suppression of diode-laser phase noise by optical filtering[J]. Journal of the Optical Society of America B Optical Physic, 2005, 22(11): 2338–2344.
- [8] 项晓, 王少锋, 侯飞雁, 等. 利用共振无源腔分析和抑制飞秒脉冲激光噪声的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 121–128.
- [9] PASCHOTTA R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology[M]. Germany: Wiley-VCH, 2008.
- [10] JONES R J, MOLL K D, THORPE M J, et al. Phase-coherent frequency combs in the vacuum ultraviolet via high-harmonic generation inside a femtosecond enhancement cavity[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(19): 193201.
- [11] SCHMEISSNER R, THIEL V, JACQUARD C, et al. Analysis and filtering of phase noise in an optical frequency comb at the quantum limit to improve timing measurements[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3603.
- [12] IMLAU M, FALLY M, COUFAL H. Springer Handbook of Lasers and Optics[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [13] 丁璐, 项晓, 侯飞雁, 等. 基于自动扫描光栅单色仪的光学腔色散测量[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 276–281.
- [14] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics B, 1983, 31(2): 97–105.
- [15] SIEGMANA E. Lasers[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.