

# 基于自制超稳定 F-P 腔压窄 632.8 nm 外腔半导体激光线宽的实验研究

郭松杰<sup>1,3</sup>, 周月婷<sup>1,3</sup>, 吴永前<sup>2</sup>, 周晓彬<sup>1,3</sup>, 田建飞<sup>1,3</sup>, 赵刚<sup>1,3</sup>, 马维光<sup>1,3\*</sup>,  
董磊<sup>1,3</sup>, 张雷<sup>1,3</sup>, 尹王保<sup>1,3</sup>, 肖连团<sup>1,3</sup>, 贾锁堂<sup>1,3</sup>

1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学激光光谱研究所, 山西太原 030006
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209
3. 山西大学极端光学协同创新中心, 山西太原 030006

**摘要** 窄线宽激光由于其具有单色性好、稳定度高、相干长度长等优点, 广泛应用于光电检测领域, 包括相干通信、精密测量、光学频率标准、吸收光谱计量以及光与物质相互作用研究等。目前频率稳定的氦氖激光器线宽可以达到 MHz 量级, 分布反馈式(DFB)光纤激光器线宽可达 kHz 量级, DFB 半导体激光器线宽可以达到 MHz 量级, 然而光栅反馈半导体激光器可以实现百 kHz 量级线宽的输出。为了进一步压窄各类激光器线宽, 需要通过反馈控制技术来锁定激光到某一频率参考。该研究将自行设计的超稳腔作为频率参考, 实现了 632.8 nm 外腔半导体激光器(ECDL)线宽的有效压窄。本窄线宽激光产生系统的研制包括超稳腔设计、光路设计、ECDL 频率控制以及系统集成。超稳腔采用两镜法布里-珀罗腔(F-P 腔)结构, 腔体是膨胀系数约为  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  的微晶玻璃, 腔镜为一对反射率达 99.988 5% ( $\pm 0.003 5\%$ ) 的平面镜和凹面镜。为进一步减小外界环境对 F-P 腔腔长的影响, 需要对腔体进行温度控制, 本系统采用四片总功率为 96 W 的半导体制冷片以及水冷散热设计。同时为了降低声音和空气流动对腔模频率的影响, 将 F-P 腔置于真空度为  $10^{-5}$  torr 的真空室中; 另外为了有效隔振, 腔体与真空室用硅橡胶材料隔离。该系统采用的 ECDL 为德国 Toptica 公司的 DL pro 系列激光器, 其具有压电陶瓷(PZT)和电流调制两个频率控制端, 响应带宽分别为 1 kHz 和 100 MHz。激光器的频率控制采用了 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁频技术, 18 MHz 的调制频率加载到激光器的电流调制端, 通过对 F-P 腔的反射信号进行解调获得误差信号, 通过两路反馈控制, 实现了近 1 MHz 的锁定带宽。通过对系统的不断优化, 最后将自由运转状态下约 300 kHz 的激光线宽压窄到了 10 kHz 量级, 并且系统运行稳定, 连续 12 小时锁定的频率漂移量约为 30 MHz。该研究研制的 632.8 nm 窄线宽激光源不仅可以应用到吸收光谱计量领域, 同时也可以光学面型精密测量领域发挥重要作用。

**关键词** 窄线宽激光; 半导体激光器; 超稳腔; 频率锁定

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0339-06

## 引言

随着科学技术的发展, 激光作为一种成熟光源已经被广泛应用于各个领域, 与普通光源相比, 激光具有方向性好、单色性好、亮度高等优点。但是自由运转的激光器无法满足一些要求更高的光电检测领域应用, 如: 相干通信、精密测量、光学频率标准、吸收光谱计量以及光与物质相互作用研

究等。多普勒展宽测温技术(DBT)是通过测量气体多普勒展宽吸收光谱的半宽来确定玻尔兹曼常数  $k_B$ , 光谱测量的精度直接决定  $k_B$  的准确度, 而光谱精度主要是由激光频率的精度确定的, 为了获得高质量的频率基准, 超窄线宽激光的选择就是其必要条件<sup>[1]</sup>。另外作为目前气体检测灵敏度最高的噪声免疫腔增强光外差分子光谱(NICE-OHMS)技术, 在多普勒展宽光谱机制下已获得  $2.3 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  的探测灵敏度, 且达到了散粒噪声极限噪声水平的 1.44 倍, 为

**收稿日期:** 2020-01-17, **修订日期:** 2020-04-21

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFA0304203), 山西省 1331 重点学科建设计划(111 计划)项目(D18001), 国家自然科学基金项目(61675122, 61875107, 61875108, 11704236, 61905136, 61905134 和 61775125), 山西省回国留学人员科研资助项目(2017-016), 中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金项目(JJ-2018-02)资助

**作者简介:** 郭松杰, 1993 年生, 山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 激光光谱研究所硕士研究生  
e-mail: guosongjie101@163.com \* 通讯作者 e-mail: mwg@sxu.edu.cn

了进一步提高测量灵敏度, 压窄激光线宽就显得非常必要<sup>[2]</sup>。光学元件作为光学仪器的重要组成部分, 其加工质量直接影响仪器的产品性能<sup>[3]</sup>。面形误差是光学元件的一个重要参数, 检测面形误差最常用的方法有单光路干涉法和双光路干涉法<sup>[4]</sup>。前者由于被测光学平面和光学样板接触, 容易对光学平面造成损伤, 难以实现无破损在线测量。泰曼-格林技术<sup>[5]</sup>作为迈克尔逊干涉技术<sup>[6]</sup>的一种变形, 由于其在激光线宽之内的各种波长的光都会各自产生一组干涉条纹, 这就导致除零级条纹以外, 其余各级条纹间也会发生位移和重叠, 使得最终的干涉条纹对比度下降, 从而引入测量误差。为了进一步提升基于双光路干涉技术对光学元件面形误差的测量精度, 需要有效压窄主激光源的线宽。

压窄激光线宽通常需要将激光频率锁定到某一频率参考来实现, 频率参考一般有两种, 一种是分子(或原子)的跃迁谱线中心频率<sup>[7]</sup>; 另一种是 F-P 腔的共振频率<sup>[8]</sup>。当采用第一种参考时, 最大优点是长期稳定性好, 但由于谱线本身具有一定的展宽, 影响激光线宽的压窄程度, 使得短期频率稳定性较差。将激光频率锁定在 F-P 腔腔模上, 由于频率参考的宽度可以控制, 能获得很好的鉴频特性谱线, 可以大大压窄激光线宽, 具有良好的短期频率稳定性, 另外参考频率可以任意改变, 但是需要特殊设计来提高频率的长期稳定性<sup>[9]</sup>。

为了实现激光到高精度 F-P 腔的频率锁定, 可以采用光学反馈或者电子学反馈两种技术来实现, 前者主要应用于半导体激光器, 将腔的反射信号反馈给激光输出端面, 在一定条件下可以实现激光到腔模的频率锁定, 而后者常采用主动负反馈的方式将误差信号反馈给激光频率的电压控制端。Pound-Drever-Hall (PDH) 锁频技术<sup>[10-11]</sup>是最有效的激光到 F-P 腔的频率锁定技术之一。该技术采用频率调制原理, 在高频下探测误差信号, 避免了低频噪声的影响, 大大提高了误差信号的信噪比和锁定性能。为了实现任意频率的线宽压窄, 本文将 632.8 nm 激光锁定到 F-P 腔腔模, 考虑到进一步提高系统的频率稳定性, 将 F-P 参考腔放置于真空气室内, 并采取了温度控制和隔振措施。基于以上设计, 将该激光器的线宽从 300 kHz 压窄到 10 kHz 量级。因此本窄线宽激光产生系统的研制包括了超稳腔的设计、光路设计、ECDL 的频率控制以及系统的集成四个部分。

## 1 实验部分

### 1.1 窄线宽激光产生装置

整套窄线宽激光产生的实验装置如图 1 所示, 图 1 左上角为该系统的实物图。首先, 激光源采用德国 Toptica 公司的 DL-Pro 型外腔光栅反馈半导体激光器, 输出中心波长为 632.8 nm, 波长调谐范围约为 6 nm, 自由运转状态下输出激光线宽约 300 kHz, 无跳模调谐范围大于 5 GHz, 输出功率 30 mW。然而由于 632.8 nm 波段的激光二极管管性能不如常规波段的管子, 导致这个波段的 ECDL 激光器性能不稳定, 无跳模范围较窄, 且容易跳模, 极大的限制了本系统对激光线宽的压窄能力。由该激光器输出的 632.8 nm 激光通过一

个 1:1 光纤分束器(PN635R5A1, Thorlabs)被分为两束, 一束直接输出, 作为以后应用的光源。另一束用来耦合到 F-P 腔, 获得激光到腔模频率锁定的误差信号。用于频率锁定的激光首先经过一个 40 dB 空间光隔离器(IO-2D-633-VLP, Thorlabs), 来降低 F-P 腔反射光对激光器的反馈; 然后经过一个二分之一波片( $\lambda/2$ )来调节激光的偏振方向, 使得激光能高效通过偏振分束镜(PBS);  $\lambda/2$  波片和 PBS 中间放置一个焦距为 500 mm 的凸透镜, 用于完成激光到 F-P 腔的模式匹配; 由 PBS 和一个四分之一波片( $\lambda/4$ )构成环形器来提取腔前镜的反射光信号, 并由光电探测器 PD1(PDA10A-EC, Thorlabs)探测; F-P 腔的透射光信号由 PD2(PDA10A-EC, Thorlabs)探测, 用于监视频率锁定状态。

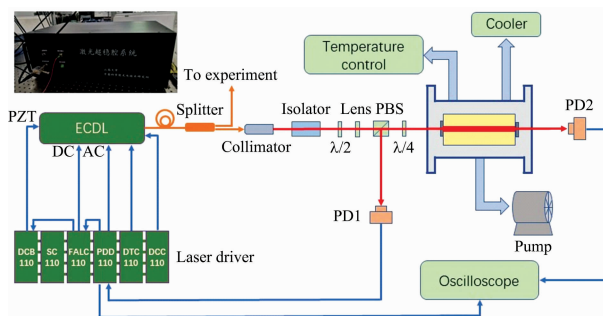


图 1 窄线宽激光产生的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of narrow linewidth laser

### 1.2 超稳定 F-P 腔设计

本系统采用一个自制的高精度 F-P 腔, 该腔腔体采用膨胀系数在  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  量级的微晶玻璃, 腔长为 100 mm, 直径为 50 mm, 自由光谱区 1.5 GHz。腔体两端用真空胶粘贴高反镜, 两片高反镜分别为一片平面镜和一片曲率半径为 1 000 mm 的凹面镜, 镜片材料是熔融石英。两片高反镜的表面镀膜完全相同, 镜片在 632 nm 处的  $0^\circ$  反射率为  $99.9885\% \pm 0.0035\%$ , 透射率约为 0.01%, 腔精细度为 27 000<sup>[12]</sup>, 以此计算可得腔模线宽为 55 kHz。超稳腔的机械结构示意图及剖面图如图 2 所示。

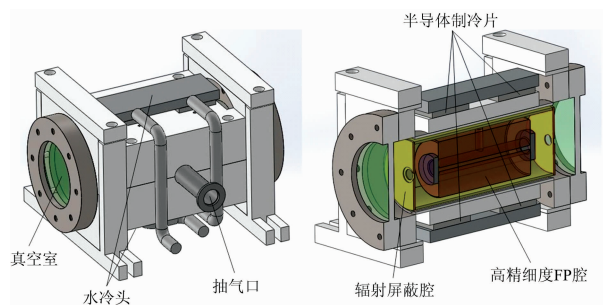


图 2 超稳腔机械机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of super stable cavity mechanical mechanism

虽然 F-P 腔腔体的膨胀系数极低, 但是外界的温度变化、机械振动、空气流动等因素还是会对 F-P 腔腔模频率造成一定的影响, 难以实现稳定的频率输出, 所以系统采取了

一系列措施来克服这些因素的影响,使之成为超稳定 F-P 腔(简称超稳腔)。首先,为了减少声音噪声、空气对流以及环境温度变化对腔长的影响<sup>[13]</sup>,我们将 F-P 腔放置于真空度为  $10^{-5}$  torr 的不锈钢真空腔室中。考虑到真空环境中的热量是以辐射方式传递,同时为了进一步降低热辐射对 F-P 腔的影响,在其外侧安装了一个用无氧铜材料制成的辐射屏蔽腔,其表面镀有厚度为  $0.25\ \mu\text{m}$  的金膜,目的是提高辐射屏蔽腔对热辐射的反射效率。实验前期,我们发现电镀的外层金膜在真空环境里有挥发现象,为了防止挥发的金膜附着在腔镜以及真空室的法兰窗片上,将镀金的屏蔽辐射腔放入烘烤箱里烘烤,使容易挥发的外层金膜在高温下先挥发掉。考虑到隔离机械振动,我们将 F-P 腔的腔体环绕两个硅橡胶圈放置于该辐射屏蔽腔内,辐射屏蔽腔与真空室之间也用硅橡胶圈隔开。该辐射屏蔽腔不仅可以屏蔽热辐射,避免真空室的温度变化以热辐射的形式直接作用于 F-P 腔,进一步提高超稳腔的温度控制效果,同时在真空系统充放气过程中还可以起到保护 F-P 腔的作用。为了更进一步获得高稳定度的腔模,还需要对真空室进行主动控温<sup>[14]</sup>。由于系统中 F-P 腔放置于真空室中,不能直接对 F-P 腔进行温度控制,所以我们的控温对象是整个真空腔室,真空腔室外设计有铝结构件,使其紧密贴合腔室,通过对铝块的温度控制来实现对真空室的温度控制。阻值  $10\ \text{k}\Omega$  的热敏电阻放置于铝块侧面的开孔里,与铝块紧密接触,实时读取真空室的温度。四块相同的额定电压  $12\ \text{V}$ 、额定电流  $2\ \text{A}$  方形半导体制冷片分别贴于铝块的上下表面,为铝块均匀加热。采用一个额定功率  $250\ \text{W}$  的温度控制器驱动半导体制冷片,设置温度控制器,将真空室的温度控制在  $25\ ^\circ\text{C}$ ,温度稳定度为  $\pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ 。为了保证制冷片的良好散热,获得稳定的温度控制效果,不引入额外的振动和噪声,制冷片采用水冷散热的方式进行散热。为了减少超稳腔与空气进行热交换,用隔热棉将超稳腔紧密包裹。最后,将激光器、超稳腔和光路部分集成到一个机箱里,

放置于隔振平台上,进一步降低外界振动的影响。通过以上一系列措施,可以大大减小外界环境对 F-P 腔产生的影响,提高锁性能。

### 1.3 ECDL 激光器到超稳腔的频率锁定

我们采用 PDH 锁频的方法完成 ECDL 激光器到超稳腔的频率锁定,在锁定过程中,误差信号经过 PID 控制模块后同时反馈控制两部分:激光器的电流和光栅上的压电陶瓷(PZT)。电流负责高频部分反馈控制,压电陶瓷负责低频部分反馈控制。频率反馈控制的硬件部分主要包括反射光路、调制解调单元(PDD 110)、PID 控制单元(FALC 110)和高压放大器单元(DCB 110)。具体过程为 PDD 110 单元产生  $18\ \text{MHz}$  的正弦波调制信号,输入到 ECDL 激光器的电流 AC 端口,对激光器的电流进行频率调制。反射光路探测器 PD1 接收的信号送到 PDD 110 单元进行解调,产生误差信号。误差信号送到 FALC 110 单元后被分为慢速环路和快速环路。慢速环路连接 DCB 110 的 PZT 控制端,控制激光器反馈光栅上的 PZT,快速环路连接激光器电流 DC 输入端,控制激光器的电流。通过慢速和快速两路锁定,完成宽带宽的频率反馈控制,保证良好的锁定性能。

## 2 结果与讨论

图 3(b)和(c)分别表示激光频率扫描状态下的 F-P 腔误差信号和透射信号。激光控制器的扫描模块产生高压三角波,直接扫描激光器的 PZT,改变激光器的输出频率。当激光频率与 F-P 腔共振时,在透射端可以观察到腔模信号,如图 3(c)所示,在每个透射峰的两侧,可以看到两个幅度比较小的调制边带,图 3(b)为控制器 PDD 110 单元对 PD1 探测的 F-P 腔反射信号解调产生的误差信号。图 3(a)为与激光控制器扫描信号同周期的方波触发信号。由于激光控制器产生的三角波扫描信号为高压信号,无法直接在示波器上监视。

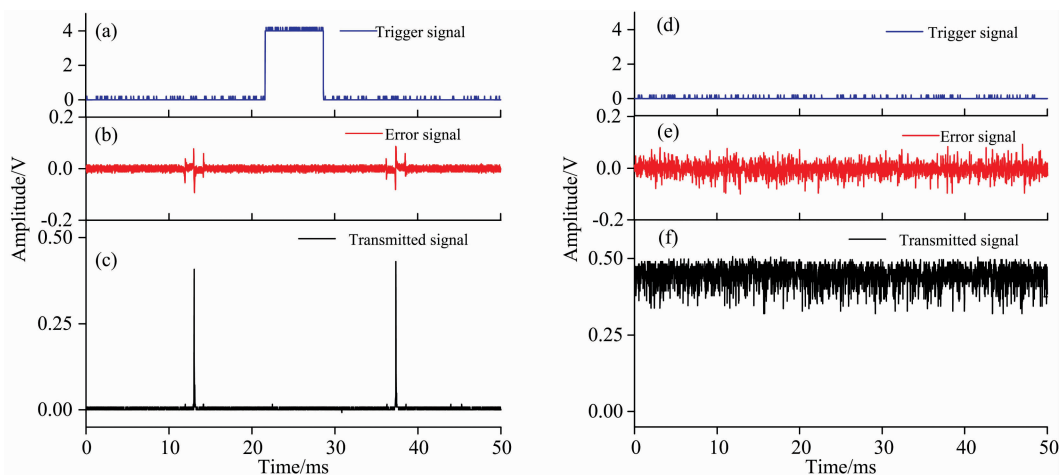


图 3 扫描状态(左)及锁定状态(右)的腔透射信号和误差信号

(a): 扫描触发信号; (b): 扫描状态下的误差信号; (c): 扫描状态下腔透射信号;

(d): 扫描关闭后的触发信号; (e): 锁定状态下的误差信号; (f): 锁定状态下腔透射信号

Fig. 3 Cavity transmission signal and error signal of scanning state (left) and locked state (right)

(a): Scan trigger signal; (b): Error signal in scanning state; (c): Cavity transmitted signal in scanning state;

(d): Trigger signal in scan off; (e): Error signal in locked state; (f): Cavity transmitted signal in locked state

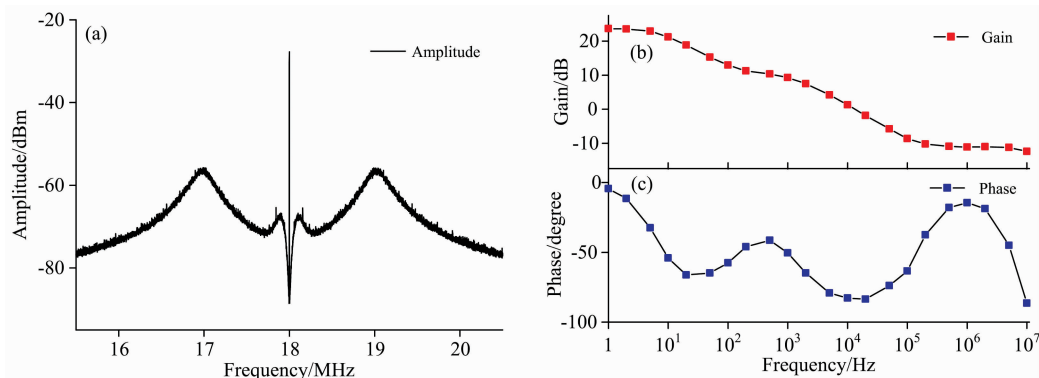


图 4 频率锁定后的频谱信号(左)和电流反馈端的 PID 频率响应(右)

(a): 频率锁定后腔反射光的频谱信号; (b): PID 增益特性曲线; (c): PID 相位特性曲线

Fig. 4 Spectrum signal after frequency locking (left) and current feedback PID frequency response (right)

(a): Spectrum signal of cavity reflected light after frequency locking; (b) PID gain characteristic curve;

(c): PID phase characteristic curve

图 3(e)和(f)分别表示锁定状态下的 F-P 腔误差信号和透射信号,此时用以扫描波长的三角波信号关闭。对比图 3(c),从图 3(f)可以看到频率锁定之后透射光的光强比腔模的峰值略高,说明已经将激光频率锁到了腔模中心。之所以锁定后功率噪声较大,主要是因为频率伺服带宽不够宽,百 kHz 段增益不够大。图 3(d)表示锁定状态下控制器的触发信号。由于频率噪声的影响,由图 3(e)表示的误差信号在零点附近抖动。

误差信号的功率谱可以用来表征系统锁定性能,图 4(a)显示了激光频率锁定到 F-P 腔后,用频谱分析仪(FSW Signal & Spectrum Analyzer 2 Hz ~ 13.6 GHz, Rohde&Schwarz)测量的图 3(e)所示的误差信号频谱。图 4(a)中中心主峰为 18 MHz 调制频率,从最外侧峰距离主峰的间隔可以看出,锁定带宽约为 1 MHz。低频范围内的噪声抑制是通过反馈控制 PZT 来实现的,而高频噪声抑制则是通过反馈控制电流调制端实现。其中对 PZT 的反馈控制为一个单积分,其积分速度为  $80 \text{ dB} \cdot \text{s}^{-1}$ 。用于电流调制端反

馈的 PID 波特图如图 4(b)和(c)所示,可见在 10 MHz 范围内相位皆小于  $100^\circ$ ,说明由图 4(b)所示的增益以负反馈形式完全加载到了电流调制端。这里的 0 dB 增益与图 4(a)的带宽不一致是因为带宽是由总开环传递函数 0 dB 增益决定的。

图 5(a)表示扫描状态下测量的误差信号,在信号上加载的高频振荡为没有解调干净的 18 MHz 调制频率信号,可以得到误差信号的峰峰值  $V_{pp}$  约为 0.34 V。依照洛伦兹函数的色散和吸收信号关系,峰峰值对应的光频率差约等于腔膜线宽 55 kHz,可以计算在零电压偏置处 PDH 误差信号幅度对频率的响应为  $55 \text{ kHz}/0.34 \text{ V}$ ,即  $162 \text{ kHz} \cdot \text{V}^{-1}$ 。该误差信号经 FALC 110 单元反馈给 PZT 输入端与电流调制端,完成激光器频率到高精度 F-P 腔膜频率的锁定。为了评估激光到腔模中心位置的相对频率噪声水平,在  $100 \text{ sample} \cdot \text{s}^{-1}$  的采样率下记录锁定 20 s 时长的误差信号,如图 5(b)所示。根据频率响应关系将电压噪声转换为频率噪声,再对频率噪声进行统计分析,并用高斯函数对其进行拟合,得到激光相对于参考腔的频率相对偏差数值,结果如图 6 所示。

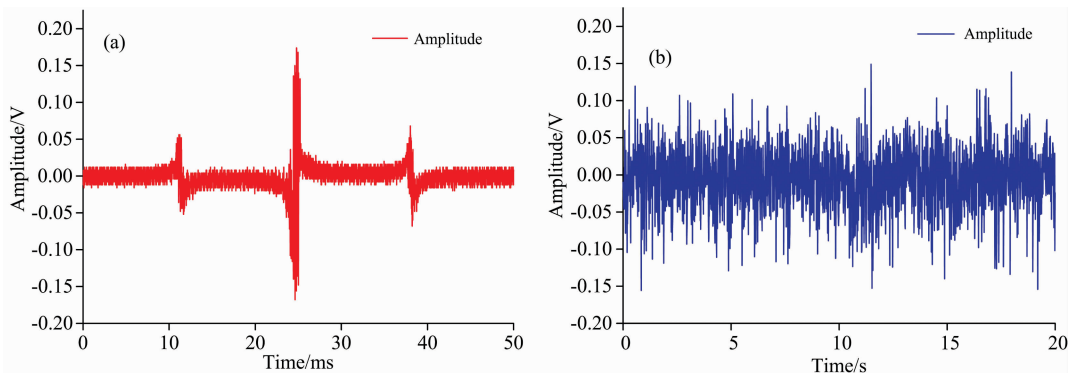


图 5 扫描与锁定状态下的误差信号采集

(a): 扫描状态下的误差信号; (b): 锁定之后 20 s 时长的误差信号

Fig. 5 Error signal acquisition in scanning and locking state

(a): Represents the error signal in the scanning state; (b): 20 s error signal after locking

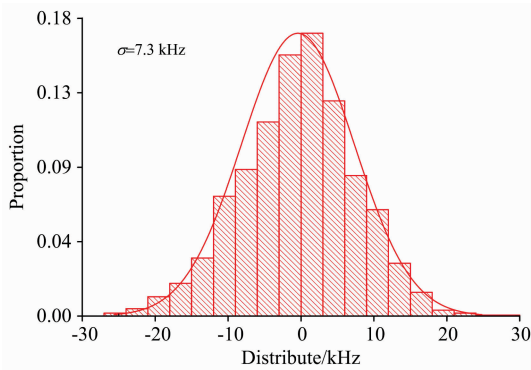


图 6 锁定后误差信号的频率分布统计  
Fig. 6 Frequency distribution statistics of error signals after locking

图中红线为高斯线型拟合结果,可以得到频率相对标准偏差为 7.3 kHz。考虑到标准偏差和高斯函数半宽的关系,其线宽约为 17.2 kHz。由于处于温控和真空系统中的 F-P 腔腔模频率噪声在 Hz 量级,因此该数值近似为此时激光器输出激光的线宽值。

为了测量锁定之后激光频率的长期稳定性,我们采用波长计(WST-60, Highfinesse)对激光频率进行了 12 h 的连续测量,频率漂移情况如图 7 所示,漂移量约为 30 MHz。从图中可以看出,锁定之后的激光频率向一个方向漂移,这是由于作为参考的 F-P 腔腔长在发生微小的变化,这与我们采用的微晶玻璃材料性能有关。

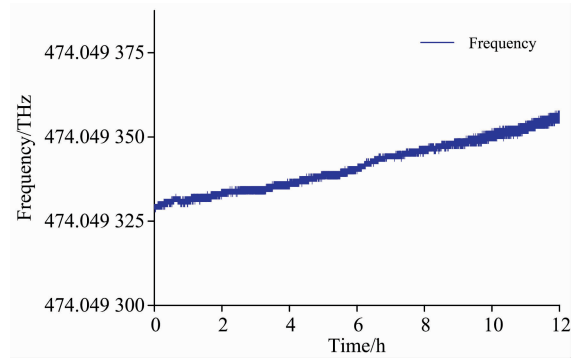


图 7 频率锁定后连续 12 h 的频率漂移  
Fig. 7 Frequency drift for 12 consecutive hours after frequency lock

### 3 结 论

为了获得高质量的激光光谱测量精度以及干涉法测量光学面型的测量精度,本文基于自主设计的超稳定 F-P 腔,实现了外腔半导体激光器线宽的有效压窄。通过对自制的高精细度 F-P 腔采取温度控制、真空密封、隔振处理等措施,大大减小了声学噪声、机械振动、环境温度变化以及空气对流对 F-P 腔的影响。采用 PDH 锁频技术,将外腔半导体激光器的频率锁定到了自制的超稳腔腔模,锁定带宽被拓展到了 1 MHz。通过对误差信号等的分析,输出激光的线宽约在 17.2 kHz,系统稳定,可以实现大于 12 h 的连续锁定,频率稳定度为 30 MHz/12 h。

### References

- [ 1 ] Cheng C F, Wang J, Hu S M, et al. *Metrologia*, 2015, 52(5): S385.
- [ 2 ] Zhao G, Hausmaninger T, Ma W G, et al. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3109.
- [ 3 ] Brosed F J, Aguilar J J, Guillomia D, et al. *Sensors*, 2011, 11: 90.
- [ 4 ] Moona G, Sharma R, Kiran U, et al. *MAPAN*, 2014, 29(4): 261.
- [ 5 ] Abdulkadyrov M A, Semenov A P, Sharov Yu A, et al. *Journal of Optical Technology*, 2010, 77(10): 621.
- [ 6 ] CAO Can, ZHANG Chao-hui, ZHAO Xiao-yan, et al(曹 灿, 张朝晖, 赵小燕, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(8): 2634.
- [ 7 ] Zhang X G, Tao Z M, Zhu C W, et al. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28010.
- [ 8 ] Leibrandt D R, Thorpe M J, Notcutt M, et al. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3471.
- [ 9 ] Zhu M H, Wei H Y, Zhao S J, et al. *Applied Optics*, 2015, 54(14): 4594.
- [ 10 ] Davide G, Riccardo G, Tommaso S, et al. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5176.
- [ 11 ] Cygan A, Lisak D, Maslowski P, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 063107.
- [ 12 ] Black E D. *American Journal of Physics*, 2001, 69: 79.
- [ 13 ] WANG Xing-chang, LI Shao-kang, LI Gang, et al(王兴昌, 李少康, 李 刚, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2017, 37(1): 0112004.
- [ 14 ] Numata K, Kemery A, Camp J. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 250602.

# Experimental Study on Narrowing 632.8 nm External Cavity Diode Laser Linewidth Based on Self Made Ultra-Stable F-P Cavity

GUO Song-jie<sup>1,3</sup>, ZHOU Yue-ting<sup>1,3</sup>, WU Yong-qian<sup>2</sup>, ZHOU Xiao-bin<sup>1,3</sup>, TIAN Jian-fei<sup>1,3</sup>, ZHAO Gang<sup>1,3</sup>,  
MA Wei-guang<sup>1,3\*</sup>, DONG Lei<sup>1,3</sup>, ZHANG Lei<sup>1,3</sup>, YIN Wang-bao<sup>1,3</sup>, XIAO Lian-tuan<sup>1,3</sup>, JIA Suo-tang<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China
3. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

**Abstract** Narrow linewidth lasers are widely used in the field of optoelectronic detection due to their advantages such as good monochromaticity, high stability, and long coherence length, including coherent communication, precision measurement, optical frequency standards, absorption spectrum measurement, and research on the interaction between light and matter. At present, the linewidth of stable He-Ne lasers can reach the order of MHz. The linewidth of distributed feedback (DFB) fiber lasers can reach the order of kHz. The linewidth of DFB semiconductor lasers can also reach the order of MHz. However, grating feedback semiconductor lasers can achieve Hundreds of kHz line width output. In order to further narrow the line width of various lasers, it is necessary to lock the laser to a certain frequency reference through feedback control technology. In this paper, a self-designed ultra-stable cavity is used as the frequency reference, and the effective narrowing of the linewidth of 632.8 nm external cavity semiconductor laser (ECDL) is achieved. The narrow linewidth laser generation system includes the design of an ultra-stable cavity, the design of the optical path, the frequency control of ECDL and the integration of the system. The super-stable cavity adopts a two-mirror Fabry-Perot cavity (F-P cavity) structure, and the cavity is glass-ceramic with an expansion coefficient of about  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . The cavity mirror is a pair of flat and concave mirrors with a reflectivity of  $99.9885\% \pm 0.0035\%$ . In order to reduce the influence of the external environment on the cavity length of the FP cavity, the temperature of the cavity needs to be designed. This system uses four peltiers with a total power of 96 W and a water-cooled heat dissipation design. In order to reduce the influence of sound and air flow on the cavity mode frequency, the F-P cavity is placed in a vacuum chamber with a vacuum of  $10^{-5}$  torr. For effective vibration isolation, the cavity is isolated from the vacuum chamber with a silicone rubber material. The ECDL used by this system is the DL pro series laser from German Toptica Company, which has two frequency control terminals of piezoelectric (PZT) and current modulation, and the response bandwidth is 1 kHz and 100 MHz respectively. The frequency control of the laser uses Pound-Drever-Hall (PDH) frequency locking technology. The modulation frequency of 18 MHz is loaded on the current modulation terminals of the laser. The error signal is obtained by demodulating the reflected signal of the FP cavity. Through two-way feedback control, a locked bandwidth of nearly 1 MHz is achieved. Through continuous optimization of the system, we finally narrowed the laser line width of about 300 kHz in the free-running state to the order of 10 kHz, and the system operated stably, and the frequency drift locked for 12 hours was about 30 MHz. The 632.8 nm narrow linewidth laser source developed in this paper can not only be applied to the field of absorption spectrum measurement, but also play an important role in the field of optical surface precision measurement.

**Keywords** Narrow linewidth laser; Diode laser; Ultra-stable cavity; Frequency locking

(Received Jan. 17, 2020; accepted Apr. 21, 2020)

\* Corresponding author