

# 精密光学教学中基于超稳腔实现窄线宽性能的方法

彭 瑜<sup>1</sup>, 施清平<sup>2</sup>, 霍 虎<sup>1</sup>, 李 伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京林业大学理学院, 北京 100083;

<sup>2</sup>北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

<sup>3</sup>中国南方工业研究院, 北京 100089

**摘要** 基于半导体激光器,使用零膨胀系数材料制成超稳腔来实现窄线宽激光输出。激光二极管与光栅构成 Littrow 外腔,一级衍射后,小部分输出光用来锁定超稳腔,实现了激光的线宽压窄,大部分输出光注入到锥形放大器中,实现光功率放大。最终获得波长为 1064 nm、输出功率为 290 mW、线宽为 10 kHz 的激光输出。该技术可应用于原子、分子精密光谱领域。

**关键词** 激光技术; 线宽压窄; 超稳腔锁定; 半导体激光; 光学频率梳

**中图分类号** TN242 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.081402

## Realization of Narrow Linewidth Property Based on Ultra-Stable Cavity in Precision Optics Teaching

Peng Yu<sup>1</sup>, Shi Qingping<sup>2</sup>, Huo Hu<sup>1</sup>, Li Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

<sup>3</sup> China South Industries Institute, Beijing 100089, China

**Abstract** Based on semiconductor lasers, the zero-expansion coefficient material is employed to build an ultra-stable cavity which is used to realize a narrow linewidth laser output. A laser diode and a grating are combined to form a Littrow structural external-cavity. After the first order diffraction, a small part of the output beam is used to lock the ultra-stable cavity which realizes the linewidth narrowing, and most of the output beam is injected into a tapered amplifier to achieve an amplification of optical power. A laser output with the wavelength of 1064 nm, output power of 290 mW and linewidth of 10 kHz is finally acquired. This technique can be applied in the area of atomic and molecular precision spectroscopy.

**Key words** laser technique; linewidth narrowing; ultra-stable cavity locking; semiconductor laser; optical frequency comb

**OCIS codes** 140.5960; 140.3410; 140.3070

## 1 引 言

激光具有高方向性、高单色性和高亮度等特点,被广泛应用于工业、农业、军事、医疗、精密测量和探测、通讯与信息处理等领域<sup>[1-8]</sup>。其中,高稳定度的窄线宽激光在原子钟制造、引力场探测、基态冷却、纳米机械的量子操控和量子计算等前沿学科中有重要应用,在激光雷达、激光通信、光电对抗等国家安全领域中亦有重大的应用潜力,是激光技术领域中最活跃的研究方向之一<sup>[5-6]</sup>。目前,常用的单色性最好的激光器依靠

**收稿日期:** 2017-01-19; **收到修改稿日期:** 2017-01-25

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金(BLX2015-09)、国家自然科学基金(11504022)、国家自然科学基金重点项目(31530084)

**作者简介:** 彭 瑜(1980—),男,博士,讲师,主要从事激光应用、量子存储、零折射率超材料等方面的研究。

E-mail: pengyu@bjfu.edu.cn

光学谐振腔来稳定,反射率极高的腔镜使光子在腔中多次反射,光子作用于激光材料内的原子,激发出与自身特性完全相同的光子,构建出强光,形成激光输出<sup>[1-6]</sup>。

外腔半导体激光器(ECDL)具有线宽窄、结构紧凑、稳定性好的优点,被广泛应用于原子分子精密光谱、激光冷却、玻色-爱因斯坦凝聚、量子频标、光学频标等前沿基础研究中<sup>[1-3]</sup>,主要分为三类:1) Littrow 结构的 ECDL;2) Littman 结构的 ECDL;3) 由 Littman 结构发展而来的,由分立元件构成的折叠法布里-珀罗腔作为反馈元件的 ECDL。以上三种结构为实现窄线宽、大连续调谐范围的激光输出提供了途径。

Littrow 结构和 Littman 结构的 ECDL 可实现兆赫兹量级线宽的激光输出<sup>[1]</sup>,而以分立元件构成的折叠法布里-珀罗腔作为反馈元件的 ECDL 可实现更窄的线宽。Döringshoff 等<sup>[2]</sup>使用基于折叠法布里-珀罗腔的 ECDL,获得 11 kHz 的短期线宽;Dahmani 等<sup>[3]</sup>使用基于分立共焦腔的 ECDL,获得 20 kHz 的瞬时线宽;He 等<sup>[4]</sup>使用基于环形腔的 ECDL,获得 500 kHz 的短期线宽。

本文基于半导体激光器,使用零膨胀系数材料制成超稳腔。激光器小部分输出光用来锁定超稳腔,实现了主激光的线宽压窄;大部分输出光注入到锥形放大器(TA)中,实现了光功率的放大。

## 2 窄线宽激光器原理

激光器的基本线宽由改进的肖洛-汤斯半峰全宽公式给出<sup>[5-10]</sup>:

$$\Delta f_{\text{ST}} = \frac{1}{4\pi} \frac{hf}{P_{\text{out}} [2\gamma_{\perp} \kappa / (2\gamma_{\perp} + \kappa)]^2}, \quad (1)$$

式中  $P_{\text{out}}$  是谐振腔出射功率; $f$  是振荡频率; $h$  是普朗克常量; $\kappa$  是腔内能量衰减速率; $\gamma_{\perp} = \gamma_{\text{eg}}/2 + 1/T_2$ , 代表光学跃迁的横向消相干速率,其中  $\gamma_{\text{eg}}$  是从激发态到基态的跃迁速率, $1/T_2$  代表附加的原子退相干效应参数。

若腔的频率与原子的跃迁频率不同,则系统将工作在加权频率状态下,即<sup>[11-18]</sup>

$$f = \frac{2\gamma_{\perp} f_{\text{cav}} + \kappa f_{\text{atomic}}}{2\gamma_{\perp} + \kappa}, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{cav}}$  为腔的频率, $f_{\text{atomic}}$  为原子的跃迁频率。将(2)式代入(1)式,得到

$$\Delta f_{\text{ST}} = \frac{1}{4\pi} \frac{h(2\gamma_{\perp} f_{\text{cav}} + \kappa f_{\text{atomic}})}{P_{\text{out}} (2\gamma_{\perp} + \kappa)} \left( \frac{2\gamma_{\perp} \kappa}{2\gamma_{\perp} + \kappa} \right)^2. \quad (3)$$

由(3)式可知,改变  $\kappa$  的值可以改善激光器的输出线宽。

## 3 实 验

实验系统如图 1 所示,包括激光二极管(LD)(EYP-RWE-1060-10020-0750-SOT01-0000,Eagleyard 公司,德国)、光栅、压电陶瓷(PZT)、隔离器(ISO)、半波片、四分之一波片、TA、波长为 698 nm 的钟激光、超稳腔、飞秒钛宝石激光光学频率梳(FC8004, Menlo Systems 公司,德国)、电光调制器(EOM)、光电探测器(PD)等。其中光源采用 Littrow 结构的半导体激光器,输出波长为 1064 nm。LD 的波长覆盖范围为 960~1080 nm,中心波长为 1060 nm,最高输出功率为 60 mW。采用全息光栅(刻线密度为 1800 lp/mm)和 LD 构成激光振荡的外腔,设计的外腔腔长为 48 mm,通过调节光栅的角度实现波长的大范围选择。

使用激光电源控温一体化系统为激光器提供稳定、低噪声的电流,并对激光管进行精密温度控制。在激光管的温度为 25, 27, 30 °C 的情况下,分别测量了 ECDL 的输出功率随 LD 驱动电流的变化关系,结果如图 2 所示,可以看出,随着温度的升高,输出功率略有上升。

令 LD 的温度为 27 °C,调节 LD 的驱动电流至 70 mA,此时 ECDL 的输出功率为 17 mW,输出光经过 ISO 后注入到 TA 中,TA 的输出功率约为 290 mW,TA 的注入功率和输出功率间的关系曲线如图 3 所示。

ECDL 发出的激光经过单模光纤传输至超稳腔,为了消除由于超稳腔和光纤引起的光反馈,分别在超稳腔的前面及光纤两端加入了总隔离度为 240 dB 的 ISO。半波片和偏振分束器(PBS)分出小部分激光(小于 100  $\mu$ W),用于线宽压窄实验,其余激光用于监测激光器的模式、波长、光谱特性,以及 TA 的注入。

EOM 的调制频率设置为 10 MHz,焦距为 150 mm 的透镜用来实现激光器与超稳腔模式的匹配。四分

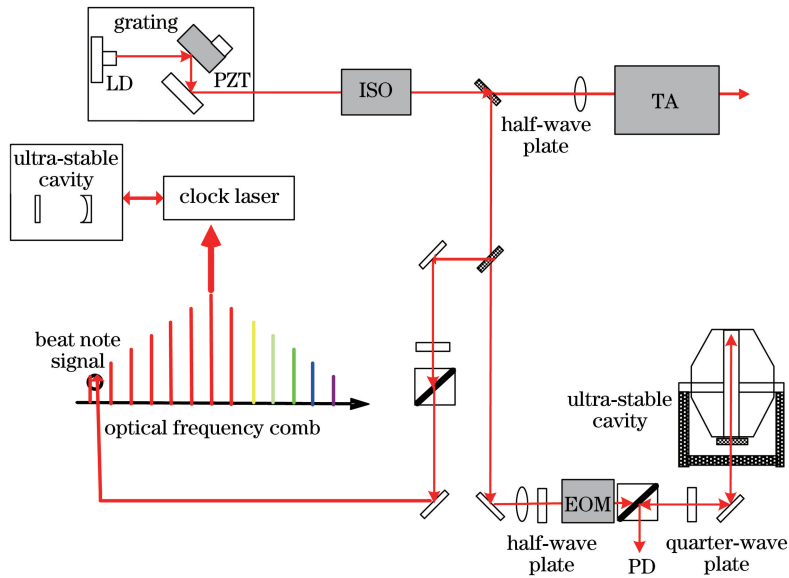


图1 使用超稳腔压缩激光线宽的实验示意图

Fig. 1 Experimental diagram of laser linewidth narrowing based on ultra-stable cavity

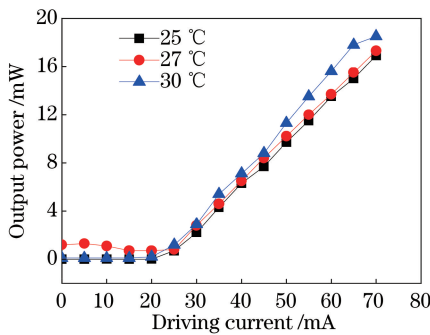


图2 不同温度下 ECDL 的输出功率随 LD 驱动电流的变化

Fig. 2 Output power of ECDL versus driving current of LD at different temperatures

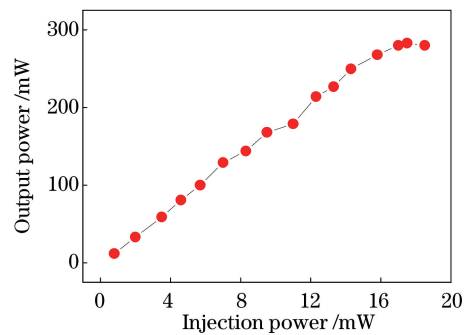


图3 TA 的输出功率随注入功率的变化

Fig. 3 Output power of TA versus injection power

之一波片用来改变振荡后出射光的偏振态, PBS 起到了选择出射光的作用。

系统中一部分控制信号经过低通滤波和放大后驱动 EOM, 另一部分控制信号经过移相后输入混频器的本振输入端, PD 信号经过放大后输入混频器的射频输入端。混频后的信号经过高速比例积分微分调节系统及伺服系统后, 分别对激光器电流和 PZT 进行快速和慢速控制。对 PZT 进行扫描时, 混频后输出的误差信号和高 Q 腔的反射模式信号如图 4(a) 所示, 当 ECDL 锁定到超稳腔后, 误差信号和模式信号如图 4(b) 所示, 图中黄线为误差信号, 紫线为模式信号。图 5(a) 为对 PZT 进行扫描时, 用常规摄像头观测到的超稳腔透射光斑; 图 5(b) 为 ECDL 锁定到超稳腔时的透射光斑, 由于外腔锁定, 透射光很强, 故探测器出现饱和现象。

飞秒光学频率梳锁模脉冲在时域中是一列规整的、等间隔的脉冲序列, 在频域中是一列等间隔的梳齿状的频率信号, 如图 6 所示, 其中梳齿间隔等于时域脉冲的重复频率  $f_r$ ,  $\Delta\varphi$  为相位差,  $E(t)$  为飞秒激光的电场强度,  $I(f)$  为飞秒激光的光强,  $f_{\text{opt}}$  为待测激光的频率,  $f_n$  为基频光的频率,  $n$  为基频光频率与重复频率  $f_r$  比值的整数部分,  $f_{2n}$  为倍频光的频率。在测定激光器脉冲重复频率  $f_r$  和飞秒光梳起始频率  $f_0$  的基础上, 可利用光学频率梳测量激光的频率。将振荡器的部分输出转换为电信号, 即可得到  $f_r$ ;  $f_0$  的探测采用自参考  $f-2f$  法, 即一光路为基频, 另一光路为倍频的方法。

采用飞秒光学频率梳测量 ECDL 外腔锁定后的激光线宽, 其脉冲宽度约为 30 fs, 覆盖的波长范围为

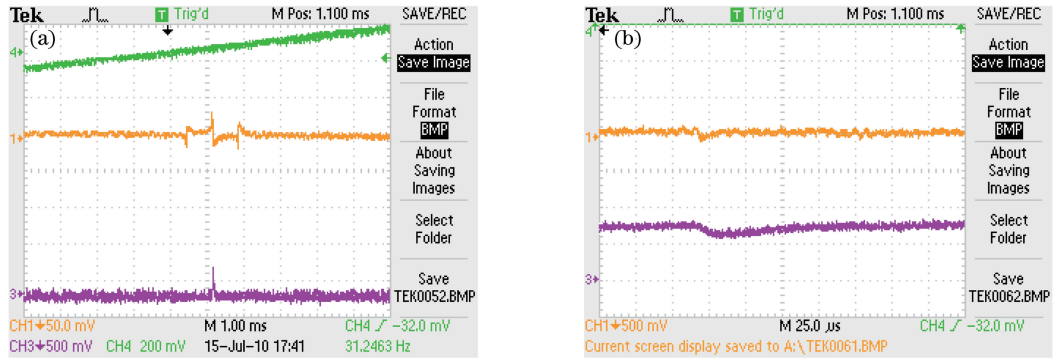


图 4 (a)对 PZT 进行扫描和(b)外腔锁定时误差信号(黄色)与模式信号(紫色)

Fig. 4 Error signal (yellow) and mode signal (purple) when (a) PZT is scanned and (b) external cavity is locked

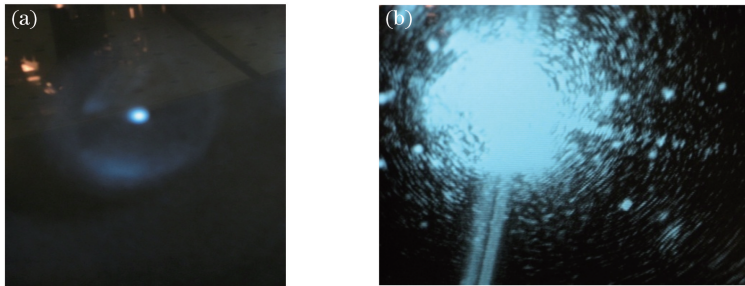


图 5 (a)对 PZT 进行扫描和(b)外腔锁定时探测到的超稳腔透射光斑

Fig. 5 Transmission light spots of ultra-stable cavity detected when (a) PZT is scanned and (b) external cavity is locked

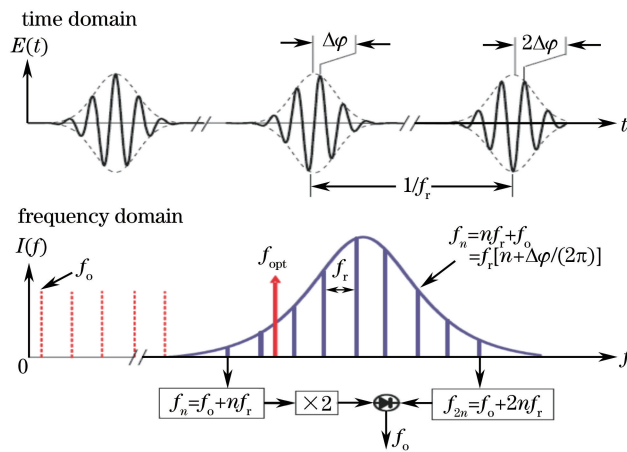


图 6 飞秒脉冲的时域图和频域图

Fig. 6 Time domain and frequency domain diagrams of femtosecond pulses

520~1140 nm。光学频率梳系统主要由光学部分和电学部分组成。光学部分包括钛宝石飞秒激光器、扩谱系统、 $f-2f$  探测系统和拍频探测系统；电学部分包括  $f_r$  锁定单元、 $f_0$  锁定单元和  $f_b$  (探测器探测到的拍频频率) 探测单元。锁定飞秒光梳的起始频率  $f_0$ ，使其等于标准铷钟的起始频率，通过使用线宽为赫兹量级的 698 nm 激光和飞秒光学频率梳的某个梳齿的拍频信号来反馈控制飞秒激光器的腔长，从而锁定  $f_r$ ，使飞秒光学频率梳的每个梳齿的线宽均可达到赫兹量级。

调节半波片，使 1064 nm 在扩谱后的光谱范围内。准直后的激光通过 1064 nm 高反镜与外部待测激光在 PBS 上进行合束。利用光栅将待测激光耦合进入 PD 中，然后对飞秒光学频率梳与 1064 nm 主激光进行拍频。ECDL 开环状态下的线宽如图 7 所示，可以看到，信号的半峰全宽约为 3 MHz，由于梳齿的线宽在赫兹量级，可以认为 1064 nm 激光器未锁定时的线宽约为 3 MHz；锁定后，信号的半峰全宽约为 10 kHz，如图 8 所示。

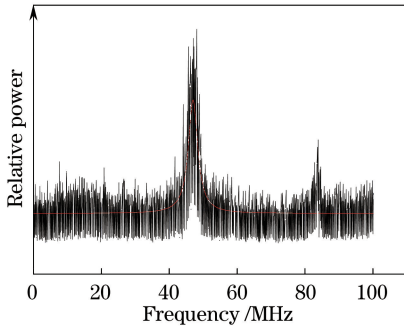


图 7 未锁定状态下 ECDL 的线宽

Fig. 7 Linewidth of ECDL under unlocked condition

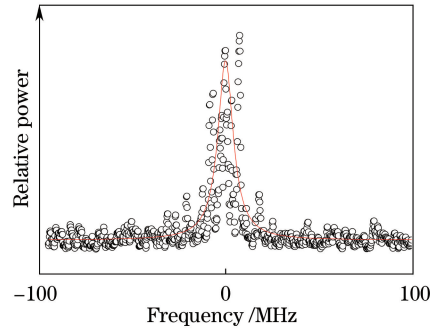


图 8 锁定状态下 ECDL 的线宽

Fig. 8 Linewidth of ECDL under locked condition

## 4 结 论

基于 Littrow 结构,实现了波长为 1064 nm、功率为 17 mW 的激光输出;对超稳腔进行锁定,采用 TA 进行光功率放大,采用光学频率梳进行线宽测量,最终获得功率为 290 mW、线宽为 10 kHz 的激光输出。优化超稳腔有利于线宽的进一步压缩;对腔体进行隔声、隔振处理可改善激光的稳定性。该技术在原子、分子精密光谱等相关领域有应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Liu K, Littman M G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(3): 117-118.
- [2] Döringshoff K, Ernsting I, Rinkleff R H, *et al.* Low-noise, tunable diode laser for ultra-high-resolution spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2876-2878.
- [3] Dahmani B, Hollberg L, Drullinger R. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(11): 876-878.
- [4] He Y, Orr B J. Robust tunable single-frequency operation of a diode laser by a self-pumped phase conjugate reflector and a high-finesse filter[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2368-2370.
- [5] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, *et al.* Sr lattice clock at  $1 \times 10^{-16}$  fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805-1808.
- [6] Teufel J D, Donner T, Li D, *et al.* Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state[J]. *Nature*, 2011, 475(7356): 359-363.
- [7] Cagnoli G, Gammaitoni L, Hough J, *et al.* Very high Q measurements on a fused silica monolithic pendulum for use in enhanced gravity wave detectors[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2442-2445.
- [8] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.* Making optical atomic clocks more stable with  $10^{-16}$ -level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 158-161.
- [9] Young B C, Cruz F C, Itano W M, *et al.* Visible lasers with subhertz linewidths[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(19): 3799-3802.
- [10] Bohnet J G, Chen Z L, Weiner J M, *et al.* A steady-state superradiant laser with less than one intracavity photon[J]. *Nature*, 2012, 484(7392): 78-81.
- [11] Jen H H. Superradiant laser: Effect of long-ranged dipole-dipole interaction[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(5): 053813.
- [12] Norcia M A, Winchester M N, Cline J R K, *et al.* Superradiance on the millihertz linewidth strontium clock transition[J]. *Science Advances*, 2016, 2(10): e1601231.
- [13] Bohnet J G, Chen Z L, Weiner J M, *et al.* Linear-response theory for superradiant lasers[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(1): 013806.
- [14] Norcia M A, Thompson J K. Cold-strontium laser in the superradiant crossover regime[J]. *Physical Review X*, 2016, 6(1): 011025.
- [15] Jahnke F, Gies C, Abmann M, *et al.* Giant photon bunching, superradiant pulse emission and excitation trapping in

- quantum-dot nanolasers[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11540.
- [16] Peng Yu, Liu Pengfei, Li Wei. Bad-cavity Raman laser based on lattice-trapped cesium atoms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041402.  
彭 瑜, 刘鹏飞, 李 伟. 基于铯原子的坏腔拉曼激光器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041402.
- [17] Peng Yu, Liu Pengfei, Li Wei. Spin-spin correlation of a bad-cavity Raman laser based on caesium atoms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021401.  
彭 瑜, 刘鹏飞, 李 伟. 基于坏腔拉曼激光器的铯原子自旋相关效应研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021401.
- [18] Peng Yu. Simulating the three-dimensional image of cold atomic cloud[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12): 4130-4134.  
彭 瑜. 冷原子的三维图像模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4130-4134.