

利用自相位延迟方法测量单块腔反馈半导体外腔激光器的线宽

彭 瑜^{1,2} 李 烨¹ 曹建平¹ 方占军¹ 臧二军¹

(¹ 中国计量科学研究院时间频率中心, 北京 100013)

(² 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要 提出了采用单块折叠法布里-珀罗(F-P)腔作为外腔反馈元件实现窄线宽半导体激光器,采用单块腔的光学反馈来锁定外腔激光器,使用自相位延迟法测量该窄线宽激光器的线宽。实验结果表明,激光器线宽小于 35 kHz。实验还观测到由于单块腔耦合面上各耦合点的几何量和物理量误差不一样,随着折叠面兼输入输出耦合面上的耦合点的变化,外腔激光器的线宽发生改变。

关键词 激光技术;外腔半导体激光器;单块腔;自相位延迟法

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0414001

Measurement for Linewidth of an External Cavity Diode Laser Based on Monolithic Fabry-Perot Cavity with Delayed Self-Heterodyne Method

Peng Yu^{1,2} Li Ye¹ Cao Jianping¹ Fang Zhanjun¹ Zang Erjun¹

(¹ Center of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(² Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract An narrow-linewidth external-cavity diode laser (ECDL) is presented based on a parallel monolithic folded Fabry-Perot (F-P) cavity. The frequency of the laser is locked to the monolithic F-P resonance by optical feedback. Linewidth of the laser is measured with delayed self-heterodyne method. Experimental results show the linewidth of ECDL is narrower than 35 kHz. Linewidth of ECDL changes when the position of coupling on the input/output plane changes.

Key words laser technique; extended cavity diode laser; parallel monolithic cavity; delayed self-heterodyne method

OCIS codes 140.2020; 140.3520; 140.3425

1 引 言

外腔半导体激光器(ECDL)和固体激光器相比具有线宽窄、结构小和稳定性好的优点,目前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、量子频标和光学频标等前沿基础研究领域中^[1,2]。这些研究要求激光具有很宽的连续可调谐范围、较窄的线宽和很高的频率稳定性。Littrow结构ECDL, Littman结构ECDL和由Littman结构中发展而来的由分立元件构成的折叠法布里-珀

罗(F-P)子腔作为反馈元件的ECDL为实现窄线宽、大连续调谐范围的激光输出提供了可能的途径。Littrow结构和Littman结构ECDL可实现兆赫兹线宽,甚至几百千赫兹^[3~5],而由分立元件构成的折叠F-P子腔作为反馈元件的ECDL可实现更窄的线宽,达几十千赫兹。如:德国Universität Düsseldorf的K. Döringshoff等^[6]使用由分立元件构成的折叠F-P腔作为反馈元件的光栅ECDL,短期线宽可达11 kHz;美国National Bureau of

收稿日期: 2011-09-27; **收到修改稿日期**: 2011-11-15

基金项目: 国家973计划(2005CB725401)、国家重大专项(2010CB922902)和国家科技支撑计划项目(2006BAK03A20)资助课题。

作者简介: 彭瑜(1981—),男,博士研究生,主要从事光频标方面的研究。E-mail: y-peng07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 臧二军(1955—),男,博士,研究员,主要从事光频标及其测量等方面的研究。E-mail: ejzang@nim.ac.cn

Standards(NBS)的 B. Dahmani 等^[7]使用由分立共焦腔作为反馈元件的 ECDL,短期线宽 20 kHz;澳大利亚 Macquarie University 的 Yabai He 等^[8]使用由分立元件构成的环形腔作为选模元件的 ECDL,短期线宽可达 500 kHz。而对于把折叠 F-P 腔的反射镜和折叠镜直接做在一块光学材料上,以解决分立元件折叠 F-P 腔稳定性不好、易受到外界干扰、体积大和不易调节的问题,目前没有文献进行相关报道。

本文提出了使用单块折叠 F-P 腔^[9~12]作为外腔反馈元件来实现窄线宽激光器,用单块腔替代掠衍射光栅外腔激光器(入射到光栅的角度小于光栅的一级衍射角)结构的反射镜,激光二极管(LD)发出的光经光栅一级衍射后,被单块腔反馈回光栅,其一级衍射光原路返回 LD。LD 被锁定在 Q 值为 52 的单块腔上,激光线宽可小于 35 kHz,实现窄线宽。实验结果表明:采用单块腔作为反馈元件的半导体激光器体积小,稳定性好,不易受到外界干扰,易于调节;采用光学注入反馈方法^[13]实现外腔锁定。采用相位延迟的方法^[14,15]对此单块 ECDL 的线宽进行测量观测。

2 实 验

实验采用掠衍射光栅结构作为激光器外腔,且入射到光栅的角度小于光栅的一级衍射角,相比于 Littman 结构(入射到光栅的角度大于光栅的一级衍射角),其一级衍射光斑在子午方向(或垂直纸面方向)比入射光斑更小,使得单块腔谐振更加稳定,从而外腔激光器更加稳定。图 1 给出了掠衍射结构的单块 F-P 腔光栅 ECDL 原理图。实验中使用商用的单纵模(HL6738MG) LD,为 AlGaInP 多量子阱结构,激光管前表面镀有 679~698 nm 范围的增透膜,其阈值电流为 50 mA,使用热敏电阻和 Peltier 致冷器对激光管进行控温。实验采用 Newport 公司的平面全息反射光栅,光栅周期为 2400 /mm,在 689 nm p 和 s 偏振方向的一级衍射效率分别为达 58%和 4%,波长选择带宽为 50 GHz,设计单块 F-P 腔自由光谱范围为 3.97 GHz。控制电流 60 mA 使得 LD 发出 5.3 mW 的激光,经过焦距为 4 mm,数值孔径为 0.55 的非球面准直透镜(COL)准直后,再经 $\lambda/2$ 波片后以 20.2° 入射在刻线面积大小为 $12.5\text{ mm} \times 12.5\text{ mm}$ 、厚度为 6 mm 的衍射光栅(grating)上,光栅的零阶衍射光作为输出光束(out)。光栅的一级衍射角为 63.5° ,其一级衍射光

以入射角 46.7° 入射到实验中的关键器件单块腔(MFC),如图 1 所示,AP 为光单块腔是包含 3 个光学面的梯形六面体,材料是低传输损耗的光学石英玻璃。梯形体底边长度 15 mm,梯形高为 13 mm,厚度为 6 mm。在该 6 面体上的 3 个光学表面中,C 点(耦合点)所在表面为折叠面和输入输出耦合面,p 偏振,s 偏振的反射率分别为 0.95%和 98.5%。A 点和 B 点所在的表面构成等效 F-P 腔的两端反射面,其反射率为 99.9%。D 点所在平面为折叠面,通过内全反射原理实现光束的折叠,光学加工中 90° 的角度公差和 3 个光学表面的塔差严格控制在 $2''$ 以内。光栅的一级衍射光在兼做折叠面和输入输出耦合面上的 C 点入射,入射光在 C 点发生反射和折射。其中折射进入折叠 F-P 腔的光束部分,正入射在镀有高反射膜的反射表面上的 B,在该点被反射后,返回到折叠面 C 点,在 C 点发生透射和反射,其中反射部分以大于全反射的角度入射在 D 点。在 D 点发生全反射后,折向镀有高反射膜的反射面上的 A 点,以正入射方式在 A 点被反射后回到全反射折叠面上 D 点,然后回到折叠面兼输入输出耦合面上的 C 点。并在 C 点发生透射和反射。在 C 点的透射光束中,其光谱表现在谐振频率处透射光最强。而沿着外部反射光束方向的透射光的总合,与外部直接反射光束相干叠加形成镜反射光束,该光束强度在谐振频率处达到最小值。由于 F-P 腔的选频作用,使得光栅外腔的选频作用被进一步增强,其效果表现为激光振荡的频率噪声被进一步压缩,从而实现激光线宽的压窄。M 光束用来检测外腔激光器的状态。

实验采用光学注入锁定方法对单块 ECDL 实现锁定。如图 2 所示,使外腔激光器锁定在单块腔

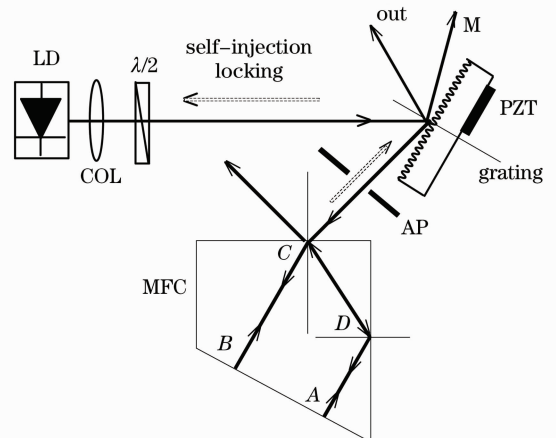


图 1 单块外腔原理图

Fig. 1 Schematic of the monolithic external cavity

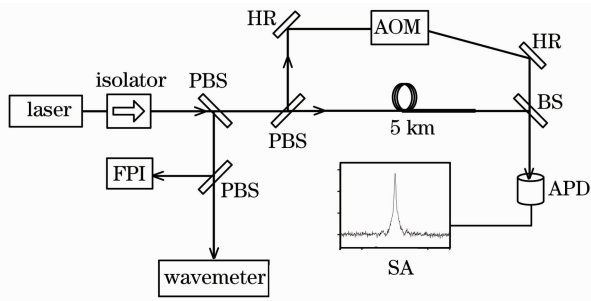


图 2 自相位延迟测量方法装置

Fig. 2 Setup of delayed self-heterodyne method

的谐振频率上,实现光栅外腔对单块腔频率的跟踪或同步。

实验使用 F-P 干涉仪(FPI),精度为 0.1 pm 的波长计以及射频频谱分析仪(Agilent N9320A)对激光波长和模式进行监测。采用相位延迟的方法对单块外腔激光器的线宽进行测量观测。如图 2 所示,激光经过 5 km 单模光纤与另一束经过声光调制器(AOM)(偏频为 80 MHz)的光进行拍频,通过频谱分析仪(SA)来观测激光器的线宽,图中 H 为半波片,HR 为高反率镜,BS 为分光棱镜,PBS 为偏振分光棱镜,APD 为雪崩光电探测器。由于单块腔耦合面上各点的角度、几何量和物理量误差不一样,随着折叠面兼输入输出耦合面上的 C 点的变化,外腔激光器的线宽发生改变。如图 3 所示,射频频谱仪的带宽分辨率为 10 kHz,扫描率为 46 ms/div,图线为多次求平均的结果;图 3 中曲线 1 为 C 点几何量和物理量误差较大时,外腔激光线宽较宽,谱线分布较宽;曲线 2 为 C 点几何量和物理量误差较小时,外腔激光线宽较窄。如图 4 所示,通过自相位延迟法测量单块激光器线宽,谱线分布比较集中,线宽

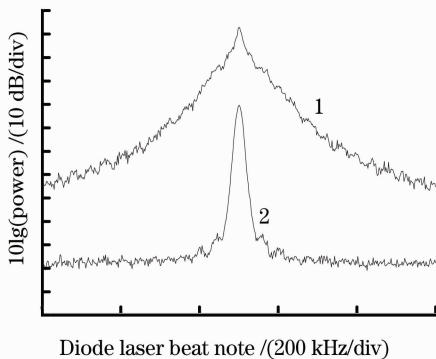


图 3 单块 F-P 腔的入射耦合点 C 的不同引起线宽的变化

Fig. 3 Linewidth of monolithic F-P cavity changes with the input coupling position of C

为 35 kHz(图中 -20 dB 的带宽为 20 kHz,但测量的线宽受限于测量方法,即由于光纤只有 5 km 长,使用相位延迟方法只能分辨 35 kHz 的线宽),激光线宽要远远小于 Littman, Littrow 结构的外腔激光器。实验发现,没有外腔的激光管的线宽达 20~50 MHz, Littrow 结构的外腔激光器线宽为 200 kHz(图 5 曲线 1); Littman 结构的外腔激光器线宽为 400 kHz(图 5 曲线 2),图 5 曲线 3 为单块外腔激光器的线宽。

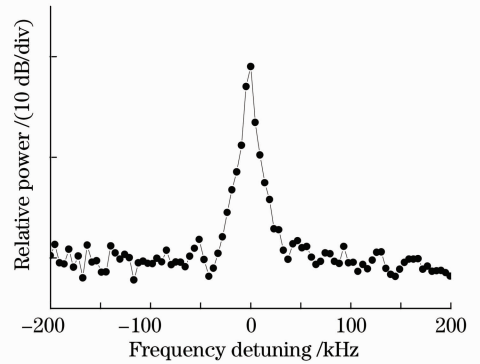


图 4 自相位延迟测量方法测量的 ECDL 的线宽

Fig. 4 Measurement of linewidth for ECDL with delayed self-heterodyne method

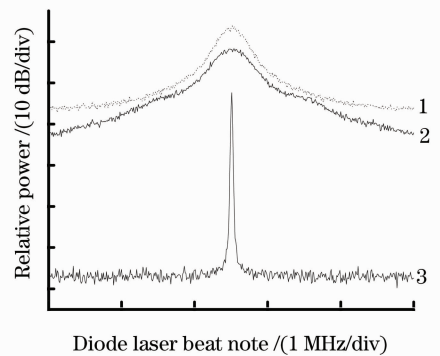


图 5 3 种 ECDL 线宽对比

Fig. 5 Comparison of linewidth of three ECDLs

3 结 论

实验设计了一个单块折叠 F-P 腔作为反馈元件的 ECDL,通过选择合适的单块腔耦合入射点,激光器线宽实现小于 35 kHz;实验采用光学反馈注入对外腔进行锁定以及对整个外腔进行控温,使得激光器有着良好的稳定性,为原子和分子光谱技术以及实现⁸⁷Sr 光钟提供了基础。

改进线宽测量方法,能更加准确地测量线宽;如:使用两台同等的激光器进行拍频测量线宽,或者通过增加光纤的长度,提高相位延迟方法测量线宽的分辨率,能更加准确地测量线宽;而提高单块腔光

学面的光洁度,以及单块腔的机械加工精度,光学面的反射率,可以进一步获得更窄线宽的激光器。

参 考 文 献

- 1 Y. li, T. Ido, T. Eichler *et al.*. Narrow-line diode laser system for laser cooling of strontium atoms on the intercombination transition[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3-4): 315~320
- 2 Lei Pingshun, Xue Lifang, He Jun *et al.*. Output characteristics of Littrow-type grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **48**(3): 031402
雷平顺, 薛力芳, 何 军等. Littrow 型光栅外腔半导体激光器的输出特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **48**(3): 031402
- 3 Karen Liu, Michael G. Littman. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(3): 117~118
- 4 Peng Zhang, Yanrong Song, Xinping Zhang. High power vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 401~403
- 5 Min Gao, Qing Ye, Zuoren Dong. Beam steering of external cavity diode laser by an intracavity electro-optic ceramic detector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(8): 081406
- 6 K. Döringshoff, I. Ernsting, R.-H. Rinkleff. Low-noise, tunable diode laser for ultra-high-resolution spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(19): 117~118
- 7 B. Dahmani, L. Hollberg, R. Drullinger. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 876~878
- 8 Yabai He, Brian J. Orr. Robust tunable single-frequency operation of a diode laser by a self-pumped phase conjugate reflector and a high-finesse filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(20): 2368~2370
- 9 Erjun Zang, Jianping Cao, Ye Li. Single-frequency 1.25 W monolithic lasers at 1123 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 250~252
- 10 Erjun Zang, Jianping Cao, Mingchen Zhong. Relaxed alignment tolerance of monolithic ring lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7014~7017
- 11 Zang Erjun, Cao Jianping. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 335~340
臧二军, 曹建平. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的 532 nm 激光[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 335~340
- 12 Zang Erjun, Cao Jianping, Li Chengyang. Experimental investigation of fast frequency tuning on monolithic seminonplanar ring lasers with PZT [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 931~934
臧二军, 曹建平, 李成阳. 半非平面单块激光器快速频率调谐的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 931~934
- 13 T. W. Hänsch, B. Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity [J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**: 441
- 14 Tadashi Nezu, Yosuke Tanaka, Takashi Kurokawa. Delayed self-heterodyne linewidth measurement of fiber Bragg grating laser[C]. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003, 388
- 15 Bo Wu, Yongzhi Liu, Zhiyong Dai. Stable narrow linewidth Er-doped fiber laser at 1550 nm[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(6): 1453~1456

栏目编辑: 宋梅梅