

激光器稳频技术研究

苑丹丹 胡姝玲 刘宏海 马 静

(北京航空航天大学光电技术研究所, 北京 100191)

摘要 在窄线宽激光器的应用领域中,激光频率稳定度是一个极其重要的指标参数,表征频率稳定的程度。基于被动稳频和主动稳频技术的实质区别——有无稳定的频率参考,主要针对主动稳频技术综述了激光稳频技术的国内外研究进展,包括:根据选用频率标准的不同进行分类;分析了常用的激光稳频技术的原理及达到不同稳频精度的原因;根据国内外关于主动稳频技术的研究报道,将其优缺点进行比较分析。经过反复对比,相位调制光外差(PDH)稳频技术具有明显的优势,可以得到极高的频率稳定度。

关键词 激光器;激光稳频;主动稳频;稳定度;复现性

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.081401

Research of Laser Frequency Stabilization

Yuan Dandan Hu Shuling Liu Honghai Ma Jing

(Institute of Opto-Electronics Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In many application fields of narrow linewidth lasers, laser frequency stability is an extremely important parameter, and characterizes the degree of frequency stability. Based on the virtual difference between passive frequency stabilization and active frequency stabilization——having stable frequency reference standards or not, laser frequency stabilization techniques are studied, especially for active frequency stabilization; classification is done based on the selection of frequency standards; the theory and reason of reaching different precisions of frequency stabilization technologies commonly used are analyzed; advantages and disadvantages are compared based on reports of the active frequency stabilization at home and abroad. By comparison repeatedly, the PDH technology has obvious advantages, can obtain high frequency stability.

Key words lasers; laser frequency stabilization; active frequency stabilization; stability; reproducibility

OCIS codes 140.3425; 140.3280; 140.3460

1 引 言

窄线宽激光器作为现代科学技术重要标志之一,已经在精密干涉测量^[1]、光频标^[2]、激光通信^[3]、激光陀螺^[4]、激光雷达^[5]等诸多领域得到了广泛的应用。在激光的众多应用领域中,激光频率稳定度是一个极其重要的指标参数。因此,随着激光应用的发展,激光稳频技术成为基础科学研究的重要方向,在现代科学技术中发挥着越来越重要的作用。

频率稳定性(S)表征频率稳定的程度,通常指激光器在连续运转时,在一定的时间间隔内平均频率($\bar{\nu}$)与该时间内频率的变化量($\Delta\nu$)之比。在技术上把 S 的倒数称为稳定度。稳定度又可分为短期稳定度和长期稳定度,前者是指观测取样时间在1s以内的频率变化,而大于1s的平均观测时间就视为长期稳定度。

稳频技术的实质是保持谐振腔光程长度的稳定性。依据是否有一个稳定的频率参考标准,稳频技术可以分为被动稳频^[6]和主动稳频^[7]两种方式。激光稳频的研究初期,注意力集中在外部影响因素的控制。主要通过恒温、防振、密封隔声、稳定电源、构建外腔稳频等直接的稳频方法,减小温度、机械振动、大气变化和

收稿日期: 2011-02-10; 收到修改稿日期: 2011-03-15; 网络出版日期: 2011-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61074158)资助课题。

作者简介: 苑丹丹(1986—),女,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: ydd666@163.com

导师简介: 胡姝玲(1971—),女,副教授,主要从事光纤激光器与放大器、微波光子学等方面的研究。

E-mail: hulxi@huaa.edu.cn

电磁场的影响。这种在不增加激光器元件的情况下,实现激光频率稳定的技术称为被动稳频技术。本文基于被动稳频和主动稳频技术的实质区别,针对主动稳频技术综述了激光稳频技术的国内外研究进展。

2 被动稳频技术进展

在 20 世纪 90 年代,人们多采用光纤光栅^[8]、光纤延迟线^[9]的方法来稳频;到 2000 年左右,又多使用饱和吸收体的光纤环形腔激光器^[10~12],随着各领域对单频激光器需求的深入,对激光器的输出功率也提出越来越高的要求^[13],在高功率条件下,研究人员更多地采用 littrow, littman 等体光栅结构进行选频^[14,15],如表 1 所示^[8,9,12,14,15]。

表 1 被动稳频技术进展

Table 1 Progress of passive frequency stabilization

Time	Researchers	Wavelength /nm	Frequency stabilization method	Conclusion
1991	Ball <i>et al.</i>	1548	Method of writing Bragg gratings	Linewidth of 47 kHz
1998	W. H. Loh <i>et al.</i>	1550	Self-heterodyne method with 5km fiber delay line	Linewidth of 18 kHz, power of 4 mW
2001	Yu Benli <i>et al.</i>	1539	Using the fiber ring laser with Er-doped fiber saturable absorber	Linewidth less than 0.5 kHz, power of 1 dBm
2007	Andreas Jechow <i>et al.</i>		Using littrow structure	Linewidth of 1.7 MHz, power of 1 W
2007	B. V. Zhdanov <i>et al.</i>	832	Using littrow structure	Linewidth of 11 GHz, power of 10 W

被动稳频技术包括恒温、防振、密封隔声、稳定电源、构建外腔等手段,种类较多,但均只能在一定程度上压窄线宽,很难保证频率长期稳定性和复现性,频率稳定度只能达到 10^{-7} 。也就是说,若要实现更高精度的频率稳定度,单单依靠被动稳频技术是无法实现的,必须依靠主动稳频技术。因此,本文的主要工作集中在主动稳频技术方面。

3 主动稳频技术基本原理

主动稳频技术就是选取一个稳定的参考标准频率,当外界影响使激光频率偏离此特定的标准频率时,设法鉴别出来,再人为地通过控制系统自动调节腔长,将激光频率恢复到特定的标准频率上,从而实现稳频的目的,如图 1 所示。具体地说,就是采用电子伺服控制系统,当激光频率偏离标准频率时,鉴频器给出误差信号,通过伺服系统和压电元件控制腔长,使激光频率自动回到标准频率上。因而,作为标准使用的参考频率的选择尤为重要。

其条件要求:1)频率要具有较高的稳定度和复现性;2)线宽窄;3)有足够的信噪比;4)与受控激光频率匹配。

稳频激光的频率稳定度和复现性,最终取决于参考频率的稳定度和复现性,电子伺服系统工作状态的好坏,也直接影响激光频率的稳定性。

4 主动稳频技术的几种方法

主动稳频技术依据所选取的参考标准的不同,分为两种:1)以原子或分子的跃迁谱线中心频率作为参考标准(来自腔外),常用的方法有兰姆凹陷稳频、原子光谱 Zeeman 效应稳频、原子或分子饱和吸收稳频;2)是以谐振腔共振频率作为参考标准(来自腔内),常用的方法有相位调制光外差稳频和偏频锁定技术。

4.1 兰姆凹陷稳频法

兰姆凹陷稳频法^[16]是利用非均匀加宽线性增益曲线的烧孔效应,如图 2 所示。以增益曲线中心频率 ν_0

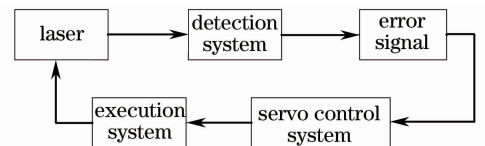


图 1 激光稳频系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser frequency stabilization

作为参考标准频率,当外界影响使激光频率偏离时,输出一个误差反馈信号,通过电子伺服系统驱动压电陶瓷环来控制激光器腔长,连续改变激光振荡频率使其向中心频率 ν_0 靠近,当振荡频率位于 ν_0 处时,“原孔”和“像孔”合二为一,此时控制压电陶瓷的直流电压输出功率为最小,频率重新稳定于 ν_0 处。

这种方法的稳频装置虽然比较简单,但在应用中存在一定的局限,体现在:

- 1)其中中心频率 ν_0 容易受放电条件的影响,而且 ν_0 作为参考频率有一定的范围,不能稳定在一个点上,虽然频率稳定度可达 $10^{-9} \sim 10^{-10}$,但是频率复现性较差;
- 2)激光管外壁是用低膨胀石英玻璃或者微晶玻璃制作,用压电晶体控制腔长,价格昂贵。

4.2 原子光谱 Zeeman 效应吸收法

原子光谱 Zeeman 效应吸收法^[17,18]是通过使用一个微弱磁场的 Zeeman 效应,分裂原子多普勒加宽吸收信号的内容。谱线分裂为具有一定频差的右旋光和左旋光,即产生双频输出。随着光谱线的分裂,增益曲线和色散曲线也发生分裂。Zeeman 分裂后的有源腔频率 ν_q^0 对称地分布于 ν_0 的两侧,左旋光与右旋光具有相等的小信号增益系数,因此具有相同的输出功率曲线。 $\nu_q^0 < \nu_0$ 时,左旋光功率小于右旋光功率; $\nu_q^0 > \nu_0$ 时,左旋光功率大于右旋光功率。测出偏振光输出功率的差值作为鉴频的误差信号,再通过伺服系统控制激光器腔长。

如图 3 所示,磁场和光的波数 K 平行或者反向,光束必须是线性偏振的。两束输出光直接注入各自的光电二极管,两个二极管的输出电压是和气泡中的圆偏振光的强度成正比的,由此获得了一个差分信号。产生的信号通过零点,适合锁定。差分信号回馈到伺服锁定回路中,由此来稳定外腔的频率。当差分信号为 0 时,说明正好锁定。

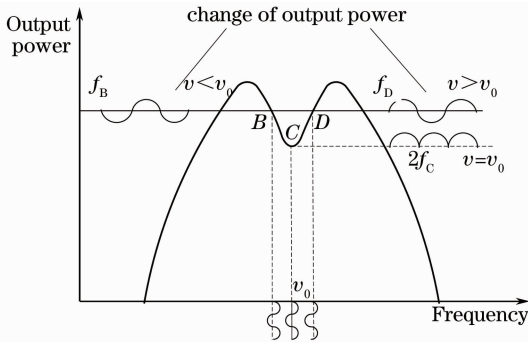


图 2 兰姆凹陷稳频原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Lamb-dip frequency stabilization

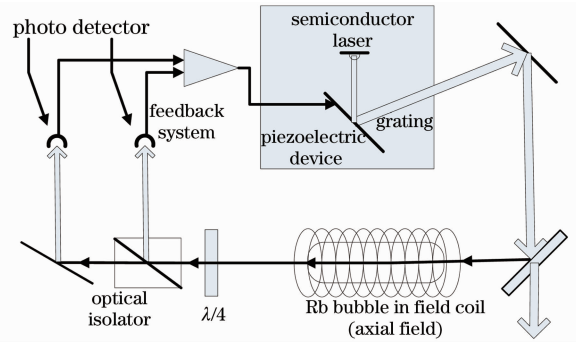


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment

此方法的优势明显,输出功率和频率均不需要低频调制,并且具有较强的抗干扰能力,可用于工业中的精密计量。但是其也存在缺陷,如体积大,价格高,适用激光系统种类较少,系统输出功率相对较低,稳定度一般在 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。

4.3 饱和吸收法

激光束通过分光板分成较强的抽运光束和较弱的探测光束以及参考光束。前两光束通过反射镜反向并交叉入射于充有气体的吸收室。调谐激光频率 ω ,当 $\omega \neq \omega_0$ (原子吸收中心频率)时,由于多普勒效应,两束光分别被运动速度方向相反的两群原子所吸收。当 $\omega = \omega_0$ 时,两束光同时和速度方向相同(相对激光束方向)的一群原子相互作用,原子被强抽运光束激励达到饱和状态,即吸收原子几乎全部被抽运光束激励到高能态,探测光束几乎没有被原子吸收就通过了气体吸收室,因此在探测光强度 I_2 和频率 ω 的关系曲线上,在 ω_0 处出现了尖峰效应,尖

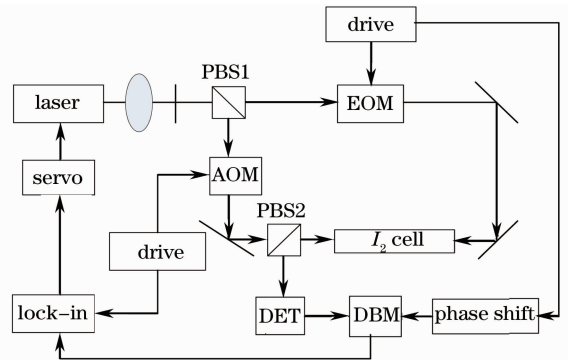


图 4 典型的饱和吸收稳频原理图

Fig. 4 Schematic diagram of classic absorption frequency stabilization

峰的宽度由低于吸收介质的均匀宽度决定,消除了多普勒加宽的影响,使尖峰的宽度变得十分狭窄,大大提高了激光的频率稳定度,如图4所示。

饱和吸收法^[7,19]的优点是频率稳定性和复现性高,这种方法频率稳定性不仅取决于吸收谱线的频率稳定性,也和谱线的宽度和信噪比有关,频率稳定度可以达到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 。输出波长受制于吸收介质,谱线频率覆盖范围有限,系统输出功率低。

4.4 相位调制光外差稳频

相位调制光外差稳频(PDH)^[20,21]是利用光学谐振腔的共振频率作为参考频率标准。该项技术的原理是将激光进行射频电光相位调制,利用法布里-珀罗(F-P)腔的共振特性和光外差光谱检测技术,得到具有良好鉴频特性的色散型谱线,以及鉴频得到激光的频率与F-P腔共振频率的误差信号,通过反馈系统控制激光的腔长,进而改变激光的频率,将激光频率锁定在光学谐振腔的共振频率上。

相位调制光外差稳频结构如图5(a)所示。光源出射信号光经射频电光调制器(EOM),产生边带光谱,入射进F-P谐振腔,反射光到达探测器上,调制光谱边带与载波拍频。若激光频率等于参考谐振频率,调制边带平衡对称,拍频输出为0;若激光频率偏离参考频率,失谐量仍在参考腔线宽内,边带的平衡对称性被破坏,则有拍频电流输出。将此误差信号适当放大后和射频参考信号一起输入平衡混频器。混频解调后,得到色散型鉴频信号,它通过伺服系统,控制激光器一端反射镜固定其上的压电陶瓷,调节激光器腔长,使激光频率的偏移量回复到0,从而将激光频率锁定在参考腔谐振频率上以实现稳频。

如图5(b)所示,通过对反射光强和频率波动的对比,确定处于谐振点哪一边。一旦测得关于频率的反射光强的微小变化,就能够反馈测量信号到激光头来保持在谐振状态。

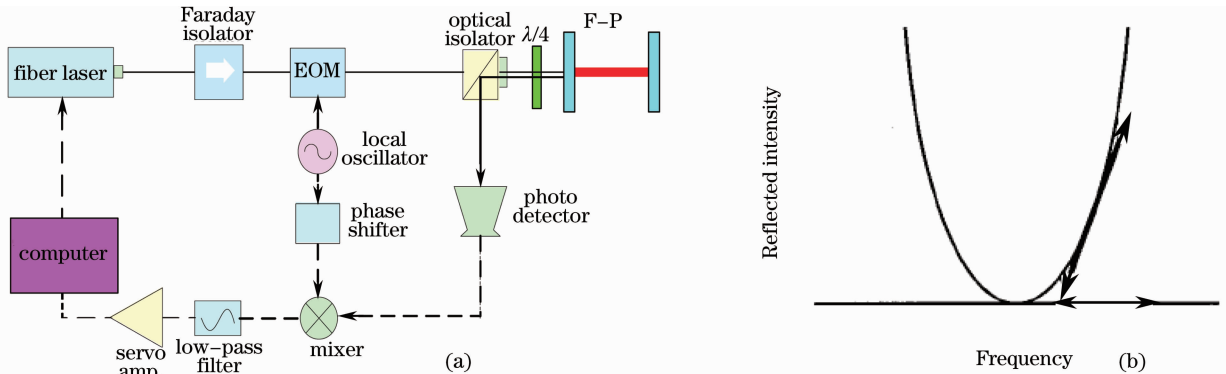


图5 (a)相位调制光外差系统原理框图;(b)随激光频率变化的F-P腔反射光强

Fig. 5 (a) Schematic diagram of PDH; (b) reflected light intensity from a Fabry-Perot as a function of laser frequency

这种技术的F-P腔具有很高的稳定性和超窄共振谱线宽度,频率稳定度能够达到 $10^{-12} \sim 10^{-16}$,还能满足几乎所有波段的稳频系统。因此,PDH技术将激光锁定在光学谐振腔上具有其他技术无法相比的优势,逐渐成为主动稳频技术中的前沿技术。

4.5 偏频锁定法

与相位调制光外差稳频技术不同,在偏频锁定技术^[22]中(如图6所示),鉴频信号产生时利用其透射曲线的斜率最大点对应的频率作参考频率,通常选用透射光强最大值的一半所对应的频率作为标准频率(实际

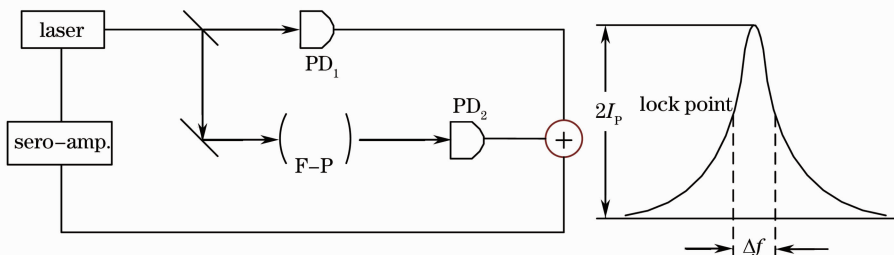


图6 偏频锁定技术的实验框图

Fig. 6 Schematic diagram of fringe-locking technology

上该点并不是透射曲线上斜率最大的点,但是易于标定),利用另一束激光构成差分系统消除激光器的功率起伏带来的影响,这样激光频率的变化会引起透射光强的变化。当激光频率为中心频率时,两个光电探测器的输出电流相互抵消;当激光频率偏离中心频率时,两个光电探测器输出电流不等。电流差通过伺服环路反馈到激光器,保持透射光强为定值,从而维持激光频率稳定。

此方法系统抗干扰能力差,光频跳变会导致失锁,频率稳定度在 10^{-8} 量级。但是关于此种方法的相关研究才刚刚开始。

4.6 各种稳频技术比较

各种稳频技术的比较^[23~33]如表2所示。

表2 稳频技术的比较

Table 2 Comparison of frequency stabilization technology

Frequency stabilization method	Advantages	Disadvantages	Stability
Passive frequency stabilization	Simple principle	Low precision, external cavity frequency stabilization easily influenced by external inference, poor long-term frequency stability and reproducibility	10^{-7}
Lamb-dip frequency stabilization	Simple device	Longtime preheating, poor reproducibility, expensive	$10^{-9} \sim 10^{-10}$
Offset frequency locking technology		Poor system anti-interference ability, optical frequency hopping will lead to loss of lock	10^{-8}
Zeeman effect frequency stabilization	Output power and frequency do not require low-frequency modulation, and anti-interference ability is strong	Big volume, expensive, few types of suitable laser system, low output power	$10^{-10} \sim 10^{-11}$
Absorption frequency stabilization	High frequency stability and reproducibility	Output wavelength is subject to absorption medium; The coverage of the frequency spectrum is limited; Output power is low	$10^{-12} \sim 10^{-13}$
Pound-Drever-Hall (PDH)	System is stable and easy to implement; F-P cavity has a high Q; it meets the requirements of narrow linewidth frequency stabilization and can achieve the ultimate of shot noise	F-P cavity is easily influenced by external interference	$10^{-12} \sim 10^{-16}$

参 考 文 献

- 1 A. S. Zibrov, R. W. Fox, R. Elling sen *et al.*. High-resolution diode-laser spectroscopy of calcium[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **59**(3): 327~331
- 2 C. W. Oates, E. A. Curtis, L. Hollberg. Improved short-term stability of optical frequency standards: Approaching 1 Hz in 1s with the Ca standard at 657 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(21): 1063~1065
- 3 H. Lin, T. Wang, T. W. Mossberg. Experimental demonstration of swept-carrier time-domain optical memory[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 91~93
- 4 Chen Xiangjun, Chen Zilai, Dai Yongjiang *et al.*. Development of the solid laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, **27**(6): 24~28
陈湘君, 陈自来, 戴永江 等. 固体激光雷达的发展现状[J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(6): 24~28
- 5 Ye wei, Zhou Kejiang, Wang Tao *et al.*. Research on the stability of the optical source in fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, **26**(1): 40~44
叶 炜, 周柯江, 王 涛 等. 光纤陀螺光源稳定性研究[J]. *红外与激光工程*, 1997, **26**(1): 40~44

- 6 G. A. Massey, M. K. Oshman, R. Targ. Generation of single-frequency light using the FM Laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **6**(1): 10~11
- 7 Jin Jie, Guo Shuguang, Wang Hongjie *et al.*. External-cavity diode laser at 1.5 μm with saturated absorption frequency stabilization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, **37**(3): 13~18
金杰, 郭曙光, 王宏杰等. 1.5 μm 波段饱和吸收稳频外腔半导体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **37**(3): 13~18
- 8 G. A. Ball, W. W. Morey, W. H. Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 1991, **3**: 613
- 9 W. H. Loh, B. N. Samson, L. Dong. High performance single frequency fiber grating-based erbium; ytterbium codoped fiber lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1): 114
- 10 M. Horowitz, R. Daisy, B. Fiseher *et al.*. Narrow-linewidth single-mode erbium-doped fiber laser with intracavity wave mixing in saturable absorber[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8): 648
- 11 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-bandfilter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875
- 12 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(4): 345
俞本立, 钱景仁, 罗家童等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 345
- 13 Wang Yajun, Zheng Yaohui, Li Fengqin *et al.*. High power all-solid-state single-frequency lasers[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2010, **16**(3): 230~239
王雅君, 郑耀辉, 李凤琴等. 全固态高功率单频激光器[J]. *量子光学学报*, 2010, **16**(3): 230~239
- 14 A. Jechow, V. Raab, R. Menzel *et al.*. 1 W tunable near diffraction limited light from a broad area laser diode in an external cavity with a line width of 1.7 MHz [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 161~165
- 15 B. V. Zhdanov, T. Ehrenreich, R. J. Knize *et al.*. Narrowband external cavity laser diode array[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(4): 221~222
- 16 E. I. Moses, C. L. Tang. High-sensitivity laser wavelength-regulation spectroscopy[J]. *Opt. Lett.*, 1977, **7**(1): 115~117
- 17 N. Umeda. Stabilized He-Ne transverse zeeman lasers[J]. *Appl Opt.*, 1980, **19**(3): 442~450
- 18 G. A. Massey, M. K. Oshman, R. Targ. Generation of single-frequency light using the FM Laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **6**(1): 10~11
- 19 Meng Tengfei, Wu Yuelong, Ji Zhonghua *et al.*. Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1182~1185
孟腾飞, 武跃龙, 姬中华等. 铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1182~1185
- 20 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 21 Eric D. Black. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(1): 79~87
- 22 Sun Xutao, Chen Weibiao. Theoretical study on laser frequency stabilization in reference to Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2219~2222
孙旭涛, 陈卫标. 基于法珀标准具的激光稳频方法理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2219~2222
- 23 T. T. -Y. Lam, B. J. J. Slagmolen, J. H. Chow *et al.*. Digital laser frequency stabilization using an optical cavity[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2010, **46**(8): 1178~1183
- 24 I. Ozdur, M. Akbulut, N. Hoghooghi *et al.*. A semiconductor-based 10 GHz optical comb source with sub 3 fs shot-noise-limited timing jitter and ~ 500 Hz comb linewidth[J]. *IEEE Photonic Technol Lett.*, 2010, **22**(6): 431~433
- 25 Evan M. Lally. A Narrow-Linewidth Laser at 1550 nm Using the Pound-Drever-Hall Stabilization Technique[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006
- 26 Zhou Renlai. Research on Frequency Stabilization Technology in Single Longitudinal Mode of Tm:YAG Laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
周仁来. Tm:YAG 单纵模激光器稳频技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
- 27 J. A. Kerckhoff, C. D. Bruzewicz, R. Uhl *et al.*. A frequency stabilization method for diode lasers utilizing low-field Faraday polarimetry[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 2005, **76**(9): 093108
- 28 De Jiaolin, Gao Liangdai, Chun Yongyin *et al.*. Frequency stabilization of transverse Zeeman He-Ne laser by means of model predictive control[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(12): 123301

- 29 Li Zhiqian, Su Fengyan, Kang Lili. Realization of FBG external cavity semiconductor laser frequency stabilization by using acetylene absorption[J]. *J. Yanshan University*, 2008, **32**(1): 37~40
李志全, 苏凤燕, 康莉莉. 用乙炔吸收方法实现光纤光栅外腔式半导体激光器稳频的研究[J]. 燕山大学学报, 2008, **32**(1): 37~40
- 30 K. Nakano, S. Maehara, M. Yanagisawa *et al.*. Frequency stabilization of semiconductor lasers for onboard interferometers using both Rb-saturated absorption profiles and double-optical feedback systems[C]. *SPIE*, 2008. 701047
- 31 John A. Smith, Xinzhao Chu *et al.*. Labview-based laser frequency stabilization system with phase-sensitive detection servo loop for Doppler LIDAR applications[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(11): 114201