

半导体激光器稳频技术

韩顺利¹, 仵欣², 林强³

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;
2. 山东省计量检测中心, 山东 济南 250014; 3. 浙江大学 物理系 光学所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 窄线宽稳频激光器在精密干涉测量、光学频率标准、激光通信、激光陀螺、激光雷达、基本物理常数测量和冷原子系统等研究领域有着广泛的应用。自由运转的半导体激光器每天的频率漂移量可以达到 GHz, 因此研究半导体激光器的稳频具有十分重要的意义。以 780 nm 的半导体激光器稳频为例, 介绍了目前广泛使用的各种半导体激光稳频技术的基本原理及试验方案, 如消多普勒饱和吸收光谱稳频技术、消多普勒双色谱稳频技术、调制转移谱稳频技术、调频光谱稳频技术和频率-电压转换稳频技术, 并对各种稳频方法的性能和特点进行了分析。

关键词: 半导体激光器; 频率稳定; 主动稳频; 参考频率

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1189-05

Frequency stabilization technologies of semiconductor laser

Han Shunli¹, Wu Xin², Lin Qiang³

(1. The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China; 2. Shandong Province Institute of Metrology, Jinan 250014, China;
3. Institute of Optics, Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Semiconductor laser with narrow linewidth and high frequency stability has been widely used in precision interference measurements, optical frequency standards, laser communication, optical gyroscope, laser radar, measurements of fundamental physics constants and cold atomic system, et. The frequency drift of a free running semiconductor laser may be up to several GHz per day. Therefore, the research on frequency stabilization of semiconductor laser is extremely necessary. A variety of frequency stabilization techniques was developed. As an example of 780 nm semiconductor laser, the principles and experimental realizations of frequency stabilization were introduced, such as Doppler-free saturated absorption spectroscopy, Doppler-free Dichroic spectroscopy, modulation transfer spectroscopy, frequency modulation spectroscopy and frequency-to-voltage conversion technology, et al. Meanwhile, the performance and characteristics of different frequency stabilization methods were analyzed.

Key words: semiconductor laser; frequency stabilization; active frequency stabilization; reference frequency

收稿日期: 2012-09-01; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 重点实验室基金(9140C120301110C1203)

作者简介: 韩顺利(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要从事光电测量仪器的研制开发方面的研究。Email: eiqd@ei41.com

0 引言

半导体激光器由于具有体积小、功耗低、波长覆盖范围大、易于调谐和良好的单色性及相干性,被广泛应用于精密激光光谱和精密计量等诸多领域。根据 Schawlow-Tones 的激光线宽理论,自发辐射引起的激光线宽极限很小,但是在实际应用中,由于激光二极管的热扰动、电子学噪声以及外界的机械振动等噪声引起的光频率的漂移远远大于激光极限线宽。在现代前沿物理的应用中,如精密谱测量、光通信、激光陀螺、激光冷却与陷阱、光钟、原子陀螺仪等^[1-4],都对激光频率的稳定性有非常高的要求,要求在数小时甚至几天内频率稳定在几个 MHz 甚至更小的范围内,而自由运转的激光器由于慢漂和跳模等原因每天可能导致的频率移动范围可能达几个 GHz,其中的慢漂主要是周围环境对激光腔体、泵浦源等因素引起的。因此,需要采取一定的措施来减小外界扰动所引起的激光频率漂移,从而对激光器的频率进行稳定。

1 半导体激光器稳频基本原理

半导体激光器的频率稳定通常采取主动稳频的办法,其基本原理是:将激光器的频率锁定在一个稳定的参考频率上,如原子或分子的高稳定的特征跃迁谱线、高 Q 值的法-珀腔的透射峰中心或斜坡处的频率以及另外一个已经稳频的激光器等。当激光频率偏移参考频率时,会产生一个误差信号,通过电子伺服系统将这一误差信号反馈给激光器的电流以及光栅的压电陶瓷上,补偿激光频率的改变,使其回到参考频率上从而达到激光稳频的目的。目前的稳频方式主要有饱和吸收光谱稳频、双色谱稳频、调制转移谱稳频、调频光谱稳频、频率-电压转换稳频等^[5-7]。文中以 780 nm 的半导体激光器稳频为例,对上述稳频方法进行分析。

2 半导体激光器主动稳频技术

2.1 消多普勒饱和吸收光谱稳频技术

消多普勒背景的饱和吸收谱(Saturated Absorption Spectroscopy, SAS)稳频技术主要是利用原子或分子的饱和吸收特性,将激光器的频率锁定在原子或分

子的饱和吸收峰上,使激光器的频率保持稳定^[8]。消多普勒饱和吸收谱稳频技术基本思想为:基于对饱和吸收光谱调制-解调的原理,通过对调制信号谐波分量的探测得到锁频点过零的鉴频信号,产生误差信号,然后再根据该误差信号由 PID 控制器对半导体激光器的 PZT 或者激光器的工作电流进行反馈控制,从而实现把激光器的输出频率闭环锁定在原子或分子的饱和吸收峰,达到稳频的目的,实验装置示意图如图 1 所示。

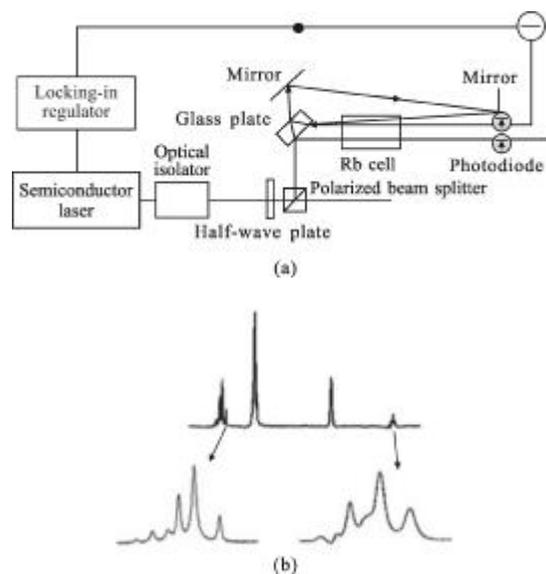


图 1 消多普勒的饱和吸收光谱及稳频装置示意图

Fig.1 Experimental setup for Doppler-free SAS laser lock

消多普勒的饱和吸收谱用来做激光稳频最大的优点就是实验光路简单易行,但是过零点的鉴频信号通常需要对激光器进行波长调制锁频(Dither locking)在稳频的过程中引入了额外的频率噪声和强度噪声,使激光器输出端频率带有调制信号的信息,即输出频率会有调制抖动。在消多普勒的饱和吸收谱中,仍然会有未消除的多普勒背景,采用一次谐波鉴频会导致类色散的鉴频曲线偏移,会造成激光锁定点对于原子共振频率的频移,因此研究者采用三次或者五次谐波稳频。

2.2 消多普勒双色谱稳频技术

1998 年 JILA 的 C. E. Wieman 等人提出了一种利用塞曼效应的简便的稳频技术-双色激光稳频(Dichroic Atomic Vapour Laser Lock, DAVLL)^[9],这种技术的基本思想是:多普勒展宽的原子吸收谱线具有高斯线型,在磁场作用下会由于塞曼效应引起

的圆偏振的二向色性导致频率的移动,通过测量不同圆偏振的吸收谱并相减就可以得到在参考频率处过零的类色散鉴频信号,从而用来实现半导体激光器的无调制绝对锁频。

实际实验中,激光器经常需要严格锁定在原子的跃迁谱线或交叉峰上,因此在 DAVLL 的基础上,又提出了消多普勒的双色激光稳频(Doppler Free DAVLL Lock^[10]或 Doppler Free Dichroic Lock,DFDL^[11]),其主要改进是在传统的双色谱上结合了饱和吸收技术,相当于在一个多普勒展宽的背景上有一个洛伦兹型的饱和吸收凹陷,然后根据二向色性产生相对频移,相减之后在低且宽的消多普勒的双色谱背景上得到了一个非常窄的类色散鉴频曲线,其典型实验装置示意图见图 2。

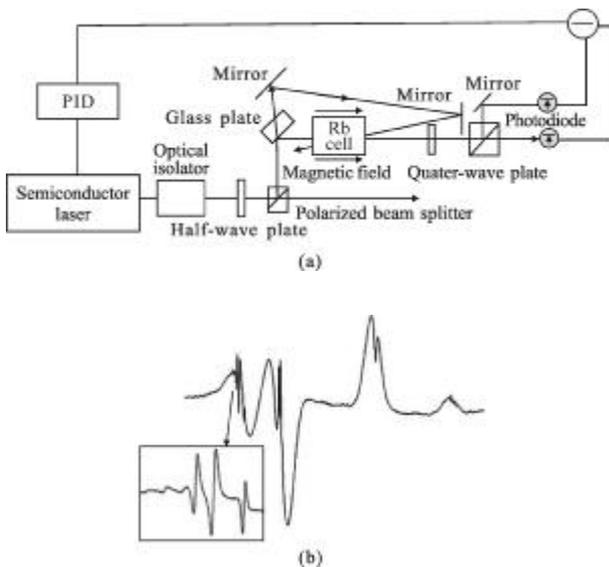


图 2 消多普勒双色谱及稳频装置示意图

Fig.2 Experimental setup for Doppler-free DAVLL

消多普勒的双色谱用来做激光稳频是一种简便易行的方式,具有很多优点:首先,过零点的鉴频信号严格对应着原子的跃迁谱线,而且不需要对激光器进行调制;其次,不易受到外界的直流磁场、激光器功率抖动以及光电探测器差异的影响;而且光路上实现起来简单,磁场也只需要十几个高斯,得到的类色散的曲线零点处斜率很大很容易实现锁频;最后,电路反馈系统只需要一个类似饱和吸收中的差分放大器直接接到 PID 上即可,不需要锁相放大器。

2.3 调制转移谱及调频谱稳频技术

调制转移谱 (Modulation Transfer Spectroscopy,

MTS)^[12-14]是一种基于非线性近简并四波混频过程的消除了多普勒背景的高灵敏度、高分辨率的光谱。MTS 具有良好的类色散型鉴频曲线,尽管只有低于 100 MHz 的频率捕获范围,但中心点(即原子共振频率)处斜率很大,而且从根本上消除了谱线的 Doppler 背景,所以很适合作为激光器稳频的鉴频信号,可以直接用于激光锁频;对激光频率的调制不是加在激光器上,而是加在泵浦光所在路径的电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)上,因此没有直接频率调制带来的线宽展宽和附加频率噪音问题,其典型实验装置示意图见图 3 中 PD1 所探测的光路。

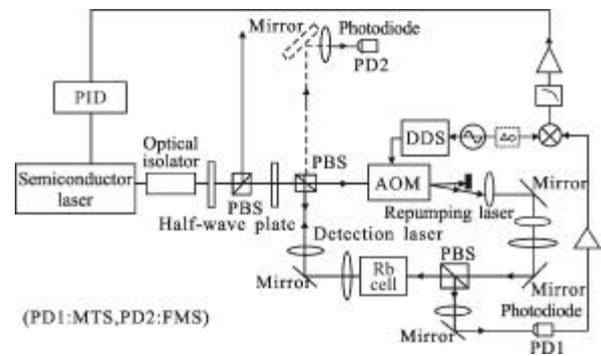


图 3 调制转移谱和调频谱稳频装置示意图

Fig.3 Experimental setup for MTS and FMS laser lock

调频光谱 (Frequency Modulation Spectroscopy, FMS)^[15]也是一种常用的稳频技术,典型的实验装置为图 3 中 PD2 所探测的光路,将 PD2 探测到的信号用相敏检测的办法就可以得到类色散的鉴频谱线。注意在深度调制时的 FMS 的色散线型跟边带锁频技术(Pound-Drever-Hall technique)^[16-17]获得的谱线类似,只不过 PDH 稳频中将原子谱线稳定在高稳的 F-P 腔上,PDH 稳频技术的优点是作为标准频率的 F-P 腔不受波段的限制,而且有很高的精细度,同时具有很大的捕获范围。

MTS 和 FMS 具有几个明显的优点:首先,谱线基底的稳定性不依赖于光的偏振、温度以及光强的改变;其次,类色散谱线的零点不受磁场以及波片角度的移动的影响,始终对应着亚多普勒跃迁的中心位置,这明显优于 DAVLL 和偏振谱。而且 MTS 对每一个超精细基态只有一个峰值特别大的信号,对应着每一个基态的循环跃迁所对应的共振谱线,这一点特别适合于那些原子超精细跃迁谱线很近的频率锁定;FMS 和消多普勒的饱和吸收具有同样多的

超精细跃迁, 这对于锁定在非基态的循环跃迁时非常有利。

2.4 频率-电压转换稳频技术

半导体激光器的稳频, 通常将激光器的频率锁定在一个稳定的参考频率上, 除了前面讲的原子或分子的高稳定的特征跃迁谱线、高 Q 值的法-珀腔的透射峰中心或斜坡处的频率外; 通常还可以将激光频率锁定在另外一个已经稳频的参考激光器上, 其典型实验装置示意图见图 4。用一个光电二极管探测两台激光器的拍频频差, 经过一个 T 型偏置

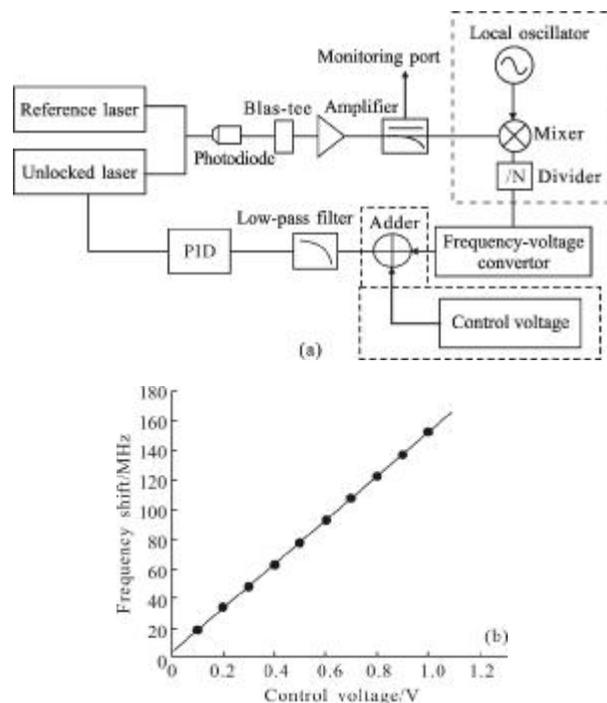


图 4 频率-电压转换稳频装置示意图及实验结果

Fig.4 Experimental setup for FVC laser lock and experimental results

(Bias Tee)和放大器后与一个本地振荡器混频, 混频的结果通过分频器分到频率-电压转换器(Frequency-to-Voltage Converter, FVC)的工作频率范围, 最后直接转换为电压信号, 然后经 PID 反馈回待锁激光器从而实现其相对于参考激光器的频率锁定, 其中的定向耦合器的另外一端输出可以用来监控或者测试。虚线框内部为非必须装置, 如果两台激光器的拍频信号直接在 FVC 的频率工作范围, 则无需与本地振荡器混频及分频, 可以直接输入 FVC; 但是如果拍频的信号为高频的微波频段, 如做拉曼光时需要频差为 6.834 GHz, 则需要将其与本地振荡器混频, 使其频谱搬运为中频信号, 然后再通过适当的分频器

使其分频到 FVC 的工作频率范围。

采用频率-电压转换稳频, 还有一个优点就是两台激光器的频差完全可调, 通常是使用一个电脑控制的模拟卡输出一个控制电压信号, 通过一个加法器与频率-电压转换器输出的电压相加, 然后输入到 PID 中反馈回待锁激光器, 可以测量知道两台激光器的频差与控制电压成正比关系, 见图 4。这样就可以通过设置不同的控制电压来实现两台激光器不同频差的实时锁定。

3 结论

文中以 780 nm 的半导体激光器稳频为例, 研究了半导体激光器的消多普勒饱和吸收光谱稳频技术、消多普勒双色谱稳频技术、调制转移谱稳频技术、调频光谱稳频技术和频率-电压转换稳频技术的原理及实验装置, 并对每种锁频技术的优缺点进行了分析, 为发展激光稳频技术及提高稳频精度提供了重要的参考方法。

参考文献:

- [1] Wieman C E, Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics[J]. Rev Sci Instrum, 1991, 62(1): 1-20.
- [2] Qu Ronghui, Cai Haiwen. Narrow linewidth lasers with high stability [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1033-1038. (in Chinese)
瞿荣辉, 蔡海文. 高稳定度窄线宽激光器的研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1033-1038.
- [3] Yuan Jie, Chen Xuzong, Chen Wenlan, et al. Structure design and third harmonic frequency stabilization of the external cavity semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 152-154. (in Chinese)
袁杰, 陈徐宗, 陈文兰, 等. 外腔半导体激光器的设计与高次谐波稳频[J]. 中国激光, 2007, 36(2): 152-154.
- [4] Yuan Jie, Chen Wenlan, Qi Xianghui, et al. Design for power supply and frequency stabilization of ECL[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35: 115-119. (in Chinese)
袁杰, 陈文兰, 齐向晖, 等. 可调谐半导体激光器的高精密驱动电源与稳频设计[J]. 红外与激光工程, 2006, 35: 115-119.
- [5] Han Shunli. Research on raman-pulse-assisted atom interferometer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 69-87. (in Chinese)

- 韩顺利. 拉曼脉冲型原子干涉仪的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 69-87.
- [6] Tao Tianjiong. Study of frequency stabilizing and phase locking for diode lasers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 49-87. (in Chinese)
陶天炯. 激光稳频锁相研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 49-87.
- [7] Xie Chenxue. Laser frequency stabilization by using modulation transfer spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 11-41. (in Chinese)
解晨雪. 基于调制转移光谱的半导体激光器的稳频方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 11-41.
- [8] Wansch T W, Shahin I S, Schawlow A L. High-resolution saturation spectroscopy of sodium D lines with a pulsed tunable dye laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1971, 27: 707-710.
- [9] Corwin K L, Zheng T L, Hand C F, et al. Frequency-stabilized diode laser with the zeeman shift in an atomic vapor[J]. *Appl Opt*, 1998, 37: 3295-3297.
- [10] Petelski T, Fattori M, Lamporesi G, et al. Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking [J]. *Eur Phys J D*, 2003, 22: 279-283.
- [11] Wasik G, Gawlik W, Zzachorowski J, et al. Laser frequency stabilization by Doppler-free magnetic dichroism [J]. *Appl Phys B*, 2002, 75: 613-619.
- [12] Zhang J, Wei D, Xie C, et al. Characteristics of absorption and dispersion for rubidium D2 lines with the modulation transfer spectrum[J]. *Opt Express*, 2003, 11: 1338.
- [13] McCarron D J, King S A, Cornish S L. Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium [J]. *Meas Sci Technol*, 2008, 19: 105601.
- [14] Liu Tao, Yan Shubin, Li Liping, et al. Frequency stabilization of laser diode via modulation transfer spectrum in cesium vapor cell [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 32(1): 5-9. (in Chinese)
刘涛, 闫树斌, 李利平, 等. 铯原子调制转移光谱在激光稳频中的应用[J]. *光学学报*, 2001, 32(1): 5-9.
- [15] Bjorklund G C, Levenson M D. Frequency modulation(FM) spectroscopy[J]. *Appl Phys B*, 1983, 32: 145-152.
- [16] Bian zhenglan, Huang Chongde, Gao Min, et al. Research on control technique for Pound-Drever-Hall laser frequency stabilizing system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 39: 0302001-1-5. (in Chinese)
卞正兰, 黄崇德, 高敏, 等. PDH 激光稳频控制技术研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39: 0302001-1~5.
- [17] Sun Xutao, Chen Weibiao. Optimization of pound-drever-hall frequency stabiliza-tion of injection-locked laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1748-1752. (in Chinese)
孙旭涛, 陈卫标. 注入锁定激光器的边带锁频技术稳频系统优化分析[J]. *光子学报*, 2008, 37(9): 1748-1752.