

自动稳频半导体激光器研究

张胤 王青

(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

摘要 实现了一种新的稳频方案。通过对饱和吸收信号进行检测,得到半导体激光器频率的变化量,利用温度粗调、电流细调的方法对半导体激光器进行稳频,根据此思路设计了基于单片机控制的稳频系统的硬件电路及软件辅助锁频程序。经实验验证,该系统实现了开机自动稳频,已经连续稳定工作超过 180 天,得到秒级稳定度 4.57×10^{-11} , 千秒级稳定度 3×10^{-12} , 近万秒级稳定度 2.78×10^{-12} 的稳定度指标。为实现稳频半导体激光器的小型化和模块化提供了一种途径。

关键词 激光器; 频率稳定度; 饱和吸收谱

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0602001

Research of Automatic Frequency Stability Diode Laser

Zhang Yin Wang Qing

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A novel frequency stabilization method is achieved. The variation of frequency is obtained by detecting saturated absorption signal, and the system is composed of a temperature coarse adjustment and a current fine adjustment to keep the frequency stabilization of the diode laser. The hardware and the software of the frequency stabilization system based on micro control unit are outlined. Through the experimental test, it can automatically achieve frequency stabilization after power on, and can work continuously and stably in more than 180 days. The initial stability of the laser is 4.57×10^{-11} (1 s), 3×10^{-12} (1024 s), 2.78×10^{-12} (8192 s). It provides a method to realize the miniaturization and modularity of frequency stability diode laser.

Key words lasers; frequency stability; saturated absorption spectrum

OCIS codes 140.2020; 140.3425; 300.1030

1 引 言

随着半导体激光器技术的迅猛发展,以及半导体激光器本身性能的不提高,半导体激光器已经广泛应用于精密计量、光纤通信、高分辨率激光光谱、中性原子的激光冷却、新型量子频标、俘获、激光探测等前沿科学研究领域。半导体激光器具有体积小、效率高、成本低、结构简单以及便于调谐等优点,使其满足了多领域的应用,但是半导体激光器在连续锁定时间长度及频率漂移等方面的问题,使得半导体激光器的应用受到了限制。如果半导体激光器的频率漂移问题能够得到改善,将会为半导体激光器开辟更广阔的应用前景^[1-2]。

所讨论的半导体激光器稳频系统是以单片机为

控制模块,集成输出控制电路,不仅具有体积小、可靠性高的特点,还可以进一步实现稳频控制系统和测试系统间的数据交换和存储,通过其控制激光器寻找谱线,继而锁定谱线,并在失锁后迅速找回谱线重新锁定,达到长期稳频的目的。

本文讨论了半导体激光器稳频的基本原理及方法。介绍了自动稳频半导体激光器的硬件电路设计及软件设计流程。针对系统进行了拍频实验测量,对测量结果进行了分析。

2 半导体激光器稳频的基本原理及方法

对于自由运转的半导体激光器,因受到工作环境条件等各种因素的影响,激光输出频率通常是随

收稿日期: 2013-12-24; 收到修改稿日期: 2014-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61027016)

作者简介: 张胤(1981—), 硕士, 工程师, 主要从事激光技术、量子频标等方面的研究。E-mail: zhangyin@pku.edu.cn

时间变化的无规律起伏量。要使激光频率稳定,则要通过稳频技术来解决,因此稳频技术成了现代精密测量技术中必不可少的一种手段。

在实际应用及实验中,发现影响半导体激光器输出频率稳定性的因素有很多,如工作温度对能带间隔、谐振腔腔长和折射率等有影响,输入电流对载流子浓度、增益和能带间隔等有影响。但是在诸多因素中,通常能够直接控制的因素是温度和工作电流,通过它们可初步控制激光器的频率^[3-4]。

实验采用 Eagleyard Photonics 公司 EYP-DFB-0852-00150-1500-TOC03-000x 型激光器,属于分布反馈(DFB)激光器。该激光器的输出中心波长为 852 nm,线宽 2 MHz,电调率为 1.23 GHz/mA,温调率为 24.8 GHz/K。

目前比较实用的半导体激光器稳频技术主要有光反馈稳频技术、直接电控稳频技术以及混合稳频技术等。光反馈稳频技术是通过将激光器的频率锁定在一个更加稳定的参考源(例如:原子能级、稳定的光学谐振腔或者其他更稳定的振荡源)上来实现激光器的稳频。光反馈稳频技术主要有外腔光反馈稳频法、原子(或分子)基准稳频法、法布里-珀罗(F-P)腔稳频法等^[5-9]。

本文的实现方法为原子(或分子)基准稳频法,主要利用原子(或分子)的饱和和吸收特性,将激光的输出频率锁定在原子(或分子)的饱和吸收峰上,使激光的输出频率保持稳定。通过加调制的方法改变半导体激光器注入电流,使其输出激光的频率受到相应的调制,从而在对应的饱和吸收光谱信号中有相应的调制信息,然后对光谱信号进行鉴相等处理,得到激光频率偏移参考中心频率的信息,即误差信号,再通过对误差信号的判断,由稳频系统向半导体激光器反馈相应的控制参量,调节工作电流和工作温度,将激光输出频率稳定到原子(或分子)的饱和吸收峰,达到稳频的目的^[10]。

3 半导体激光器稳频系统的设计

整个系统的工作原理如图 1 所示。其中,光路部分由 DFB 半导体激光器输出 852 nm 激光,经过准直(ISO),由分束镜片(BS)将光路分成两束,一束透射光用来做激光器的输出,另一束反射光用来做饱和和吸收谱。该反射光在经过厚玻璃片(glass)后,产生两束反射光(每束 4% 的反射)和一束透射光(92% 的透射),两束反射光经过吸收池(cell)作为探测光进入光电探测器,而透射光经两个反射镜后作

为抽运光进入吸收池和其中的一束探测光重合。由于两路探测光中与抽运光重合的一路携带饱和和吸收信号,另一路只携带多普勒背景信号,两路信号进入差分放大模块,可以减去多普勒背景的信号,只留饱和和吸收信号。由光电探测器(PD)把光信号转成电信号进入模拟电路部分(analog circuit),输送给稳频电路;稳频电路对饱和吸收谱信号做相应的处理,经过模数控制(ADC)及运算等得到误差信号,作为激光器的反馈控制信号,再经过数模转换(DAC)输送给激光器的控制部分——控温(TEC)、控流模块(CC),最终实现激光器的频率稳定功能。

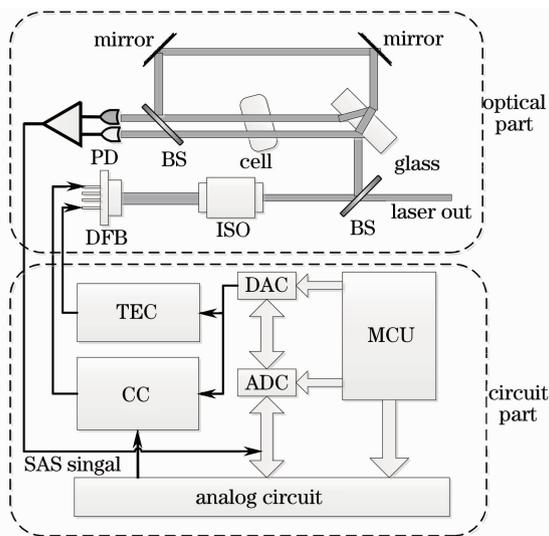


图 1 激光器系统组成框图

Fig. 1 Composition diagram of laser system

稳频电路的系统组成见图 2(a)所示。其中, C8051F020 单片机控制信号发生模块(signal generator)提供稳频所需要的调制信号(Mod signal)及鉴相参考信号(Ref signal)。通过带通滤波整形把信号发生模块输出的方波信号整形为谐波抑制比很高的正弦信号分别作为调制信号。其调制频率为 10 MHz、调制深度为 1 MHz。调制信号通过控流模块进入激光器和饱和吸收光路(SAS optical part),再由光电探测器输出,得到的光谱信号与参考信号进行鉴相。鉴相器(phase)实际上是一个乘法器,它实现了参考信号和相应鉴频信号的相乘运算。此时得到的信号为误差信号,误差信号经过比例-积分-微分(PID)运算由单片机控制其开关反馈给控流模块和温控模块,从而实现对激光器输出频率的调整。这里温控模块主要是对激光器工作温度点的调节,是针对频率漂移的慢变化来调节的,即粗调;控流模块是针对频率漂移的快变化来调节的,即细调。整个系统的数字辅助控制功能由单

片机(MCU)实现,它负责控制谱线的查找、稳频环路的闭环、监控锁定状态等工作,进而实现自动化稳

频。其中,微控制器实现找谱机制的软件设计流程详见图 2(b)所示。

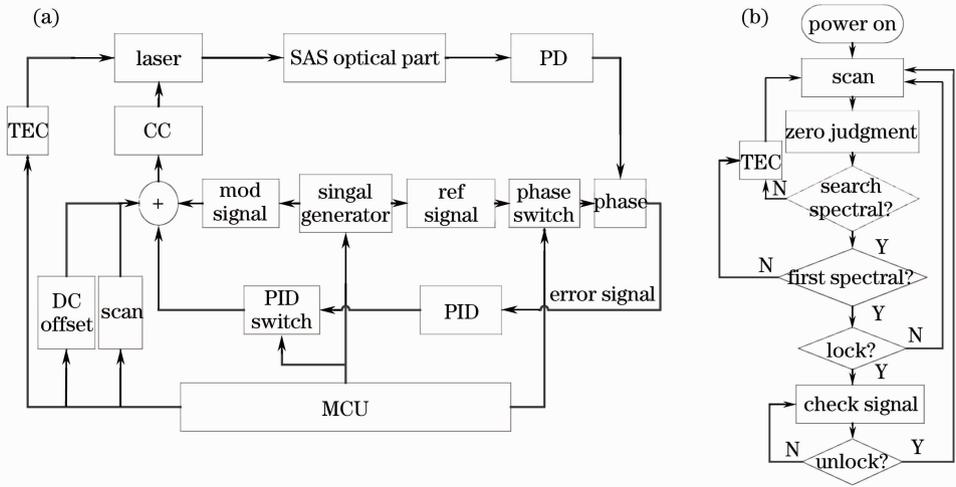


图 2 稳频系统(a)电路及(b)流程

Fig. 2 (a) Circuit and (b) flow of frequency stabilization system

4 稳频结果的测试

在实验中使用如图 3(a)所示的光路。其中,稳频激光器 A 输出的激光经反射镜反射,由一块 $\lambda/2$ 片调整偏振方向,通过一块偏振光分束器(PBS)与稳频激光器 B 输出的激光合束拍频,拍频光信号通

过雪崩光电二极管(APD)接收(带宽 1 GHz),APD 接收到的拍频信号,通过微波线接入 HP53131A 频率计进行测量。频率计的测量结果通过其 GPIB 接口由计算机采集。

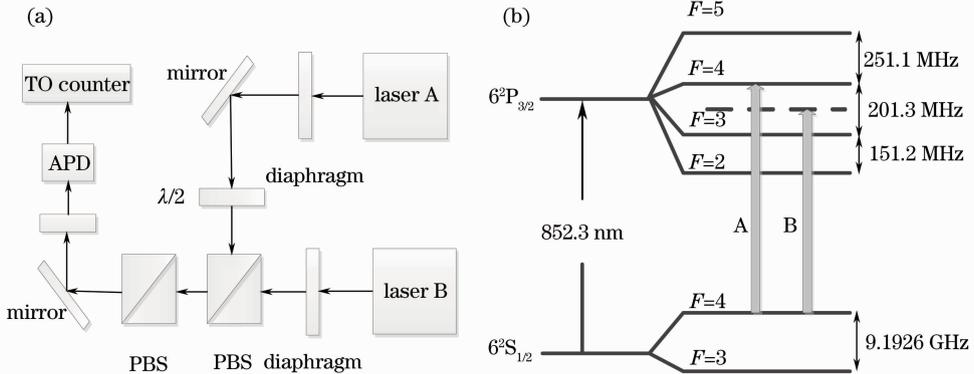


图 3 (a)频率稳定度测量实验装置及(b) ^{133}Cs 的 D2 跃迁超精细能级结构

Fig. 3 (a) Beat frequency experimental facility and (b) ^{133}Cs D2 transition hyperfine structure

图 3(b)给出了 ^{133}Cs 的 D2 跃迁超精细能级结构图。本系统要求稳频激光器 A 锁定在铯原子的 $F=4-F'=4$ 谱线上[图 3(b)中 A 线],激光 B 锁定在铯原子的 $F=4-F'=4$ 和 $F'=3$ 的交叉线[图 3(b)中 B 线]。两台稳频激光器的拍频信号中心频率应在 100 MHz 左右。

中心频率与线宽的比值,即 $\frac{\nu_0}{\Delta\nu}$; S/N 为谱线的信噪比^[11]。通过(1)式估算后该系统的频率短期(1 s)稳定度应为 10^{-11} 量级。

通常用稳定度来描述稳频激光器的频率稳定性。短期稳定度的定义为所测量的相对频率值(即频率差值) $y(t)$ 的 N 次取样方差为

对于本实验系统,可以利用频率稳定度公式

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{K} \frac{1}{Q} \frac{1}{S/N}, \quad (1)$$

其中 K 为由谱线线型决定的常数,由于本系统采用的是饱和吸收信号,为洛伦兹线型,故 $K = 1$; Q 为

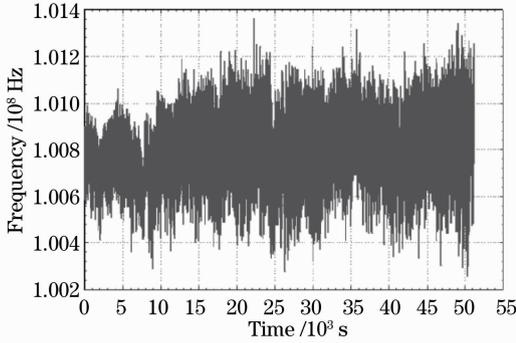
$$\sigma_y^2(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k)^2, \quad (2)$$

式中 \bar{y}_k 为 $y(t)$ 第 k 次测量的平均值, τ 为每次测量的积分时间, T 为相邻两次测量的时间间隔。Allan

证明最好利用 $N=2, T=\tau$ 的两次取样的平均值表示,称为阿伦方差。^[12]

$$\sigma(2, \tau) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m-1} (y_{k+1} - y_k)^2}{2(m-1)}}, \quad (3)$$

式中 τ 是频率测量的积分时间, m 是测量的总次数, y_k 是第 k 次测量的频率值。



拍频测试中,设定频率计 GATE 为 1 s,即 $\tau = 1$ s。通过连续采集 58472 个数据(约 16 h)计算稳定度。图 4 是稳频测量结果,秒级稳定度达到 4.57×10^{-11} ,当积分时间 $\tau = 1024$ s,稳定度达到 3×10^{-12} 。当积分时间 $\tau = 8192$ s 时,稳定度达到 2.78×10^{-12} ,与估算结果一致。

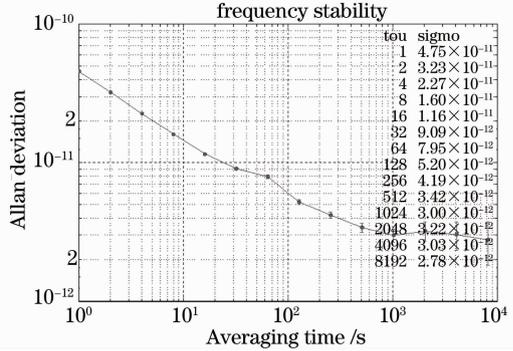


图 4 稳频激光器频率稳定度测量结果

Fig. 4 Measurement result of frequency stability of the laser

目前,本实验设计的稳频半导体激光器已经连续工作超过 180 天,实现了长期稳定工作,使得该激光器的应用可以扩展到微波频标中^[13-15]。

5 结 论

自动稳频 DFB 半导体激光器与外腔半导体激光器相比,其结构简单,目前整个光路部分体积为 $4 \times 10^3 \text{ cm}^3$;自由运行中不会发生跳膜;锁定频率值可调谐,能够满足不同频率锁定的要求;加入单片机数字辅助,可以实现自动稳频。而与氦氖激光器相比,其体积小,输出功率大,频率锁定范围广。

采用 C8051F020 单片机控制,设计出数字辅助锁定的 DFB 稳频激光器,通过温度粗调、电流细调的方法对频率进行控制,实现了谱线的自动搜索,能够开机自动稳频,并且能够连续稳定工作超过 180 天,失锁后能够在 10 s 内重新锁定,得到频率稳定度:秒稳 4.57×10^{-11} ,千秒稳 3×10^{-12} ,万秒稳 2.78×10^{-12} 。通过数字辅助控制使激光器稳频更加智能、稳定和可靠,其外设高度集成,为实现稳频半导体激光器的小型化和模块化提供了一种途径。

参 考 文 献

1 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Laser Principle (Sixth Edition)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011, 305-336.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理(第 6 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 305-336.
2 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-output and

high beam quality diode laser linear array coupling source[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202010.

张俊, 单肖楠, 刘云, 等. 千瓦级高光束质量半导体激光线阵合束光源[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202010.

3 Han Shunli, Wu Xing. Frequency stabilization technologies of semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1189-1193.

韩顺利, 仵欣. 半导体激光器稳频技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1189-1193.

4 He Zhigang, Deng Lunhua, Wang Guishi, *et al.*. Nd:YAG laser frequency stabilization technology based on digital feedback control[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702009.

贺志刚, 邓伦华, 王贵师, 等. 基于数字反馈控制的 Nd:YAG 激光器频率稳定技术[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702009.

5 Ma Xiuquan, Chen Wenlan, Chen Shuai, *et al.*. Experimental study of diode laser frequency stabilization by Zeeman modulation [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2005, 11(4): 171-175.

马修全, 陈文兰, 陈帅, 等. 半导体激光器塞曼调制稳频的实验对比研究[J]. 量子光学学报, 2005, 11(4): 171-175.

6 Deng Ke, Chen Xuzong, Wang Zhong. Minimization of the temperature coefficient of resonance frequency shift in the coherent population trapping clock[J]. Opt Lett, 2011, 36(10): 1740-1742.

7 Deng Ke, Guo Tao, He Dingwu, *et al.*. Effect of buffer gas ratios on the relationship between cell temperature and frequency shifts of the coherent population trapping resonance [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(21): 211104.

8 Xiong Wei, Zhang Yin, Ma Zhaoyuan, *et al.*. Estimating optical lattice alignment by RF spectroscopy[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(9): 090201.

9 Duan Jun, Qi Xianghui, Zhou Xiaoji, *et al.*. Detection of saturated absorption spectroscopy at high sensitivity with displaced crossovers[J]. Opt Lett, 2011, 36(4): 561-563.

10 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.

- 11 Fritz Riehle. Frequency Standards: Basics and Applications[M]. Germany: Wiley-VCH, 2006. 76—78.
- 12 David W Allan. Statistics of atomic frequency standards [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 221—230.
- 13 Guo Tao, Deng Ke, Chen Xuzong, *et al.*. Atomic clock based on transient coherent population trapping [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(15): 151108.
- 14 Huang Jiaqiang, Gu Yuan, ZhangYin, *et al.*. A DFB laser-pumped rubidium atomic frequency standard[J]. Journal of Time and Frequency, 2012, 35(2): 66—69.
黄家强, 顾源, 张胤, 等. DFB半导体激光抽运铷原子频标[J]. 时间频率学报, 2012, 35(2): 66—69.
- 15 Zhou Xiaoji, Chen Xuzong, Chen Jinbiao, *et al.*. Microwave atomic clock in the optical lattice with specific frequency[J]. Chin Phys Lett, 2009, 26(9): 090601.

栏目编辑: 韩峰