

基于电反馈方法的窄线宽半导体激光器

袁其平¹ 郑甜美² 童峥嵘² 杨秀峰² 曹晔²

¹ 天津理工大学电子信息工程学院, 天津 300384

² 天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室及智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300384

摘要 窄线宽半导体激光器广泛应用于雷达和传感等领域,因此窄线宽激光器的研究具有十分重要的意义。设计采用了电反馈的结构,从激光器发射出来的光经过一个专门设计的频率鉴别器,来稳定激光器的中心波长。光电探测器将频率鉴别器发射出来的光转化成电流,与激光器内部探测器的电信号比较,比较之后的差值反馈到激光器将激光器的线宽锁定在环路带宽范围内;从而将激光器线宽由原始的 0.5 nm 降低到 0.08 nm。

关键词 激光器;窄线宽;电反馈;相移光纤布拉格光栅;相位噪声

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.051402

Narrow Linewidth Semiconductor Lasers Based on Electrical Feedback

Yuan Qiping¹ Zheng Tianmei² Tong Zhengrong² Yang Xiufeng² Cao Ye²

¹School of electronics information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

²Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices and Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract Narrow linewidth semiconductor lasers are widely used in the field of radar and sensor. So the research of narrow linewidth laser is necessary. Using electric feedback structure, and with a frequency discriminators, the center wavelength is stabilized. The laser from frequency discriminators is converted to current by photoelectric detector. Different signals of inherent detector and the current are injected into laser to reduce the frequency noise. So the laser line width of 0.5 nm reduces to 0.08 nm.

Key words lasers; narrow linewidth; electronic feedback; phase shift fiber Bragg grating; phase noise

OCIS codes 140.2020; 140.3490; 230.5160

1 引言

高性能的光纤传感系统目标在于取得高敏感度,宽带宽和大动态范围,良好的光通信系统在于有更远的传输距离。为了取得这样的性能,光的相位通常是一个很重要的控制参数,那么激光源有低相位噪声是很重要的基础。由于半导体激光器可靠性高、寿命长、消耗低、型号小、效率高,非常有益于其在通信、传感和雷达^[1]等领域的应用。但其相对较宽的线宽和很高相位的噪声水平限制了其在各个领域的应用。

目前国内外实现窄线宽的方法有很多,如用闪耀外腔压窄激光器线宽^[2]的方法等。本文采用电反馈的方法将激光器的频率锁定到一个频率稳定的鉴别器,以降低激光器的相位浮动。频率鉴别器采用 π 相移的光纤布拉格光栅(FBG),光纤光栅在其相移处有一个很窄的透射峰,利用这一特性将激光器的频率锁定在这个尖锐的峰上,然后通过电反馈^[3]的方法反馈到激光器来校正相位的浮动,降低频率噪声,减小激光器的线宽。

实验中采用 1552.52 nm、10 mW 的分布式反馈(DFB)半导体激光器,为了获得很好的噪声强度和频率

收稿日期: 2011-12-08; 收到修改稿日期: 2011-12-28; 网络出版日期: 2012-04-01

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)资助课题。

作者简介: 袁其平(1962—),男,教授,主要从事信号处理方面的研究。E-mail: yqp1962@163.com

稳定度以及较窄的线宽,半导体激光器的温控装置和直流驱动源都要有极低的噪声,并合理地选择频率鉴别器以及设计良好的环路滤波器。

2 高性能的外围控制电路

为了获得较好的激光器的线宽,对激光器外围电路有很高的要求,根据半导体激光器的温度特性^[4],设计的温度控制^[5]的框图如图 1 所示,通过脉冲宽度调制(PWM)来控制激光器内部制冷器(TEC)的电流方向,实现对激光器制冷和加热。脉冲宽度调制部分采用专有的温度控制芯片 LTC1923 驱动 H 桥式电路实现,通过将设置的激光器的工作温度与测量的温度比较,输出控制信号对桥式电路电流的方向和大小进行控制,最后实现温度的稳定度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

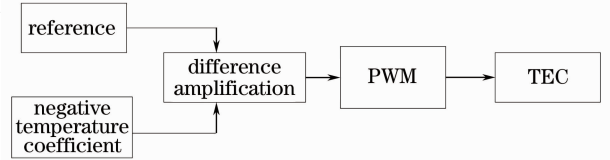


图 1 温度控制框图

Fig. 1 Diagram of temperature control

直流驱动源^[6]部分采用恒流源控制电路为激光器提供恒定的电流保证激光器功率的稳定输出,选择具有极低噪声的驱动电源,避免增大激光器的固有线宽。

3 窄线宽激光器的实现方法

激光器的线宽受很多因素的影响^[7],目前普遍应用的是光反馈和反馈光谐振的方法。增加激光器的腔长^[8,9]可以大大地减少频率噪声,使用这种方法只要合理选择腔的长度就能使激光器减小因数超过 100。在半导体激光器的外腔用一根闪耀光栅调整入射角,将一级衍射光反馈到激光器的方法可以极大地压窄激光器的光谱,获得很窄的线宽。

反馈光谐振也是目前被广泛关注的减小激光器线宽的方法。这项技术是将一小部分光经过谐振腔滤波之后反馈到激光器,这种方法相比较上面所说的光反馈的方法延长了谐振腔,提高了窄线宽激光器的灵敏度,性能好,但是需要控制反馈光的相位和长期稳定操作的频率。

电反馈的方法是减少激光器频率噪声的有效方法,它通过一个很窄的频率鉴别器将激光器频率的浮动转换成光强度的变化,基本的功能框图^[10]如图 2 所示,从激光器出射出来的一小部分光通过耦合器入射到 π 相移光纤光栅,光纤光栅反射回来的光进入到光电探测器转化为电流。这一部分反馈信号与激光器内部光电探测器探测到的信号比较,产生一个误差信号,这个误差信号经过环路滤波器生成校正信号作用于激光器,从而校正了激光器在环路锁定带宽范围内的频率浮动^[11],降低了激光器的线宽。这项技术简单易行,不会涉及光反馈敏感和模式跳跃^[12]的问题。

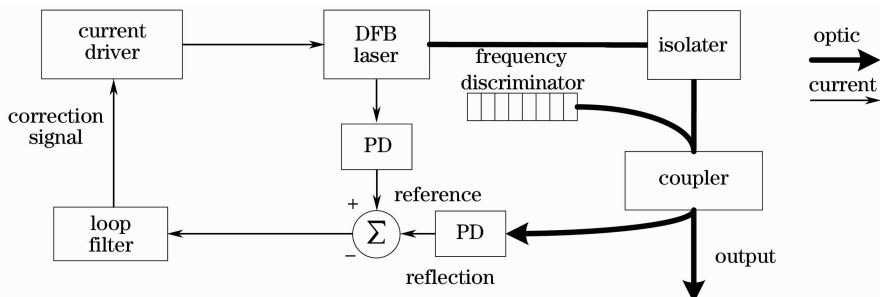


图 2 用电反馈方法实现的激光器线宽减少系统

Fig. 2 Lasers line width reduction system through electrical feedback method

3.1 频率鉴别器

为了获得较高的频率鉴别灵敏度,频率鉴别器的传输函数要能够很快地检测到频率的变化,而且这个传输函数既是吸收某一波长的结果也是两个或者更多个波长之间的干涉效应生成的结果。多普勒效应展宽了分子吸收线,所以不能应用于中心波长 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的窄线宽激光器,而且在波长操作上也不是很灵活。双光束干涉仪存在干涉效应在使传出函数随着光频率的变化快速改变的情况下,路径长度的差值必然是一个相对

较大的值。而多波束干涉如 FBG 和法布里-珀罗谐振器能够产生很窄的共振而且长度很短,并且能够达到很高的品质因数。这种器件有易于实施电反馈的方法,用很小的设备就能得到很高的性能。

由于相移的光栅^[13]有一个很窄的透射峰,比普通 FBG 更容易实现窄线宽的半导体激光器。选用了中心波长 1552.52 nm, 3 dB 带宽为 0.4 nm 的光纤光栅。如图 3 所示,采用 Matlab 仿真的方法对相移 FBG 和普通 FBG 进行了对比,图 3(a)为普通 FBG 的反射谱,图 3(b)为在光栅中心处引入 π 相移 FBG 的反射谱。可以看出 π 相移的 FBG 相比普通的 FBG 有更窄的透射峰,能够更好地实现鉴频,因此在实验中选择 π 相移 FBG 作为频率鉴别器。

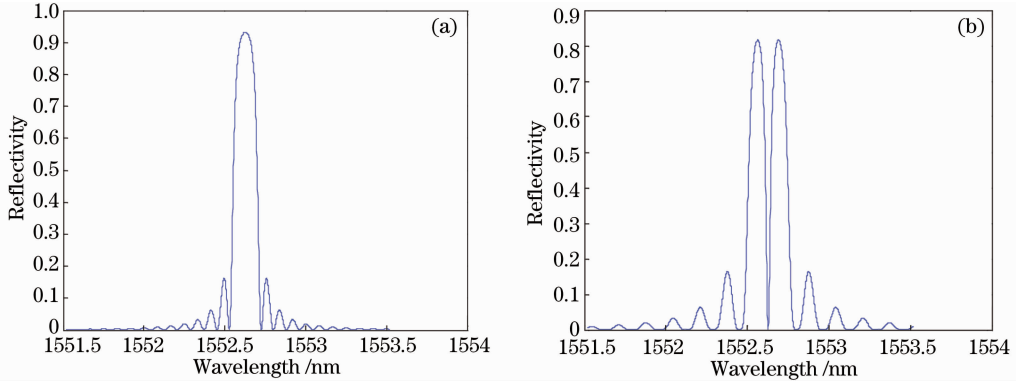


图 3 (a) FBG 反射谱;(b) π 相移反射谱

Fig. 3 (a) Reflection spectrum of FBG; (b) reflection spectrum of π -PSG

3.2 环路滤波器

环路滤波器经常被用在锁相环路中,环路滤波器分为有源滤波器和无源滤波器。无源滤波器主要是由电阻和电容组成,有源滤波器主要是由运算放大器组成。但是有源器件会带来部分噪声,而且设计相对复杂,因此成本也会相应的增加。无源滤波器的成本较低、噪声比较小,因此通常比较多的采用无源滤波器。

为了更好地抑制宽带频率上的纹波,实验中采用了三阶环路滤波器,如图 4 所示,环路滤波器参数的确定方法如下:

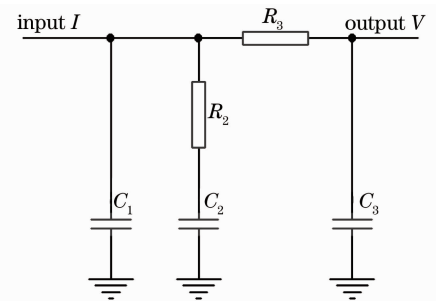


图 4 环形滤波器

Fig. 4 Loop filter

环路滤波器的传输函数可表示为

$$Z(s) = \frac{1 + sT_2}{C_{\text{tot}}(1 + sT_1)(1 + sT_3)} =$$

$$\frac{1 + sC_2R_2}{s\{s^2\{C_1C_2C_3R_3 + s[C_2R_2(C_1 + C_3) + C_3R_3(C_1 + C_2)] + C_{\text{tot}}\}\}T_2 = C_2R_2, C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 + C_3, (1)$$

根据环路带宽 f_c 和相位裕度方程确定环路滤波器的参数有:

$$\begin{cases} C_{\text{tot}} = \frac{K}{N(2\pi f_c)^2} \sqrt{\frac{1 + (2\pi f_c)^2 T_2^2}{[1 + (2\pi f_c)^2 T_1^2][1 + (2\pi f_c)^2 T_3^2]}}, \\ C_1 = \frac{T_1}{T_2} C_{\text{tot}}, C_3 = \frac{C_1}{5}, C_2 = C_{\text{tot}} - C_1 - C_3, R_2 = \frac{T_2}{C_2}, R_3 = \frac{T_3}{C_3}, \end{cases} (2)$$

式中 K 为电路的增益。

基于以上参数设计出点反馈结构所需要的环路滤波器,环路滤波器生成频率校正信号,校正激光器的注入电流,从而校正了环路锁定带宽范围内的频率浮动,进而减小了激光器的线宽。

4 实验结果及分析

实验中采用波长分辨率为 0.07 nm 的 Anritsu9710B 光谱分析仪对激光器加入电反馈前后的光谱进行

分析,图5为未加入电反馈系统和引入电反馈系统的激光器光谱图,未加入电反馈前激光器的线宽为0.5 nm,加入电反馈后激光器实现了0.08 nm的输出线宽,且边模抑制比为60 dB。可以看出激光器的输出线宽有了很明显的改善。

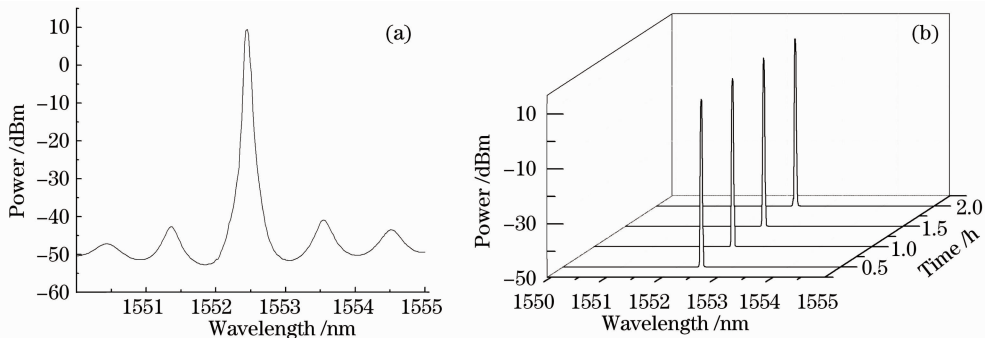


图5 光谱仪观测到的激光输出光谱。(a) 未引入电反馈系统;(b) 加入电反馈系统

Fig. 5 Output spectra observed by Spectrometer. (a) Without electrical feedback; (b) with electrical feedback

实验中调整光栅和环路滤波器的性能能够改善窄线宽激光器的光谱^[14],由于实验条件的限制,反馈结构能够实现的窄线宽光谱与理想值相差还很大,仅实现了0.08 nm的窄线宽。进一步调节驱动电流设备和温度控制装置,保证激光器具有良好的固有线宽,是降低激光器线宽的基础。

5 结 论

低噪声驱动电流电子设备的设计和温度控制装置使激光器输出具有固有线宽和相位噪声。将激光器的频率锁存到相移光纤光栅使激光器的线宽很明显的降低。在窄线宽半导体激光器的发展中还需要改善激光器的频率噪声水平,研究出具有更窄线宽的激光器。采用电反应用于光纤传感系统的多波长激光器^[15]的线宽降低方法还有待于研究。

参 考 文 献

- 1 M. Morin, S. Ayotte, C. Latrasse. What narrow-linewidth semiconductor lasers can do for defense and security? [C]. *SPIE*, 2010, **7677**: 767701V
- 2 Jiang Penfei, Zhou Yan, Xie Fuzeng. Study of blaxe grating feedback external cavity semiconductor laser with narrow-linewidth[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 869~870
姜鹏飞, 周 燕, 谢福增. 闪耀光栅外腔反馈压窄半导体激光线宽技术的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(6): 869~870
- 3 J. F. Cliche, Y. Painchaud, C. Latrasse *et al.*. Ultra-narrow Bragg grating for active semiconductor laser linewidth reduction through electrical feedback[C]. Bragg Grating Photosensitivity and Poling Conference, 2007. BTOE; BTOE2
- 4 Zhao Yiqiang, Sun Quan, Zheng Wei. Design of temperature controlling module for luminescent diode[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2006, **19**(4): 1009~1011
赵毅强, 孙 权, 郑 炜. 半导体激光器温度控制模块的设计[J]. *光传感技术学报*, 2006, **19**(4): 1009~1011
- 5 Long Yan, Ren Qingyi, Cao Kefeng. Design precise temperature control circuit for laser[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2007, **5**(2): 158~160
龙 燕, 任青毅, 曹科峰. 一种半导体激光器的精密温度控制电路[J]. *信息与电子工程*, 2007, **5**(2): 158~160
- 6 Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang *et al.*. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 02020031
杨 燕, 俞敦和, 吴姚芳等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 02020031
- 7 B. Dahmani, L. Hollberg, R. Drullinger *et al.*. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 876~878
- 8 C. Henry, Bell Labs, Murray Hill. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. *Quantum Electron.*, 1982, **18**(2): 159~164
- 9 Luo Yi, Huang Jin, Sun Changzheng *et al.*. Narrow linewidth semiconductor laser [J]. *Diodes Infrared and Laser Engineering*. 2007, **36**(2): 147~151

- 罗毅, 黄缙, 孙长征. 窄线宽半导体激光器件[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(2): 147~151
- 10 M. Poulin, S. Ayotte, A. Babin *et al.*. Low noise semiconductor laser for optical fiber sensing[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75037M
- 11 C. Latrasse, S. Ayotte, A. Babin *et al.*. Low noise semiconductor lasers for remote sensing applications[C]. 15th Coherent Laser Radar Conference, 2009
- 12 M. Ohtsu, S. Kotajima. Linewidth reduction of a semiconductor laser by electrical feedback[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **12**(12): 1905~1912
- 13 Li Yuandong, Wang Hongyan, Yang Zining. Signal broad area high power laser diode with narrowed linewidth[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 0214011
- 李元栋, 王红岩, 杨子宁. 窄线宽单宽面源大功率半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 0214011
- 14 Cai Lulu, Wu Fei, Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2070~2075
- 蔡璐璐, 吴飞, 王玉田. 相移光纤光栅反射谱特性分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2070~2075
- 15 M. Poulin, S. Ayotte, C. Latrasse *et al.*. Compact narrow linewidth semiconductor laser module[C]. *SPIE*, 2009, **7325**: 73250O
- 16 Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zhengrong *et al.*. Dual-wavelength fiber laser based on a high finesse fiber ring filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 04020101
- 杨秀峰, 魏芳芳, 童峥嵘 等. 基于高精度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 04020101