

## 基于单边带调制的前馈技术压缩半导体激光器线宽

袁其平<sup>1</sup>, 吴丽娜<sup>2</sup>, 童峥嵘<sup>2</sup>, 曹 晔<sup>2</sup>, 张卫华<sup>2</sup>

(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:** 提出了一种基于电光单边带调制的前馈线宽压缩系统, 该系统主要包括相位噪声检测和单边带调制两大部分。相位噪声检测部分输出一个与相位误差成比例的误差电压信号, 电压信号通过线性调频作用于单边带强度调制器, 实现对激光信号的调制。单边带调制器采用马赫增德尔强度调制器的结构, 相当于内嵌四个相位调制器, 通过相位调制达到强度调制的目的, 最终得到线宽压缩的激光信号。实验针对波长为 1552.52 nm、功率 10 mW 的分布反馈(DFB)半导体激光器, 通过对闭环系统的搭建与仿真, 激光器的线宽从原来的 0.5 nm 减小到 0.016 nm, 实现了对半导体激光器线宽的压窄。

**关键词:** DFB 半导体激光器; 单边带调制; 前馈技术; 频率噪声; 线宽

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1699-05

## Line width of feed-forward technology compression semiconductor laser based on single side-band modulation

Yuan Qiping<sup>1</sup>, Wu Lina<sup>2</sup>, Tong Zhengrong<sup>2</sup>, Cao Ye<sup>2</sup>, Zhang Weihua<sup>2</sup>

(1 School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Key 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:** An electro-optical feed-forward line width compression system based on single side-band modulation was put-forward, which included phase noise extraction as well as single side-band modulation. The phase noise extraction outputted an error voltage signal proportional to the phase error, and the voltage signal modulated the laser signal through the linear frequency modulation's effects on the single side-band intensity modulator. The single side-band modulator, adopting the structure of MZ intensity modulator, equivalent to inline four phase modulators, achieved intensity modulation through phase modulation, and finally got the line width compression laser signal. The experiment aims at DFB semiconductor laser, with wavelength of 1552.52 nm, power of 10 mW, and through the construction and simulation of the closed-loop system, the laser line width decreases from 0.5 nm to 0.016 nm, which realized the compression of DFB semiconductor lasers.

**Key words:** DFB semiconductor; signal side-band modulation; feed-forward technology; frequency noise; line-width

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00100); 天津青年基金(13JCQNJC01800)

作者简介: 袁其平(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事移动通信方面的研究。Email: yqp1962@163.com

## 0 引言

窄线宽分布反馈(DFB)半导体激光器因其可靠性高、寿命长、消耗低、体积小、效率高和可直接调制等特点,在通信、传感和雷达领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。在半导体激光器的众多参数中,半导体激光器的线宽是限制其应用范围的一个重要指标。目前通用的半导体激光器可以满足光纤通信,激光医疗和印刷等领域的要求,但在高分辨率激光光谱仪、相干光通信等领域的应用仍受到限制<sup>[3]</sup>。所以针对如何降低激光器的线宽,已经提出了很多研究方法,其中光反馈技术和电反馈技术的应用较为普遍。

光反馈技术<sup>[4]</sup>主要包括原子或分子吸收线稳频,饱和吸收法稳频,法布里-珀罗腔稳频和外腔光反馈稳频。光反馈能有效地压缩激光器的线宽,但光学反馈腔体积较大成本较高,且存在模式跳变现象。2011年,中国科学技术大学近代物理系的江晓等人<sup>[5]</sup>,设计了一套基于原子饱和吸收法的激光稳频系统,虽然采用 21.4 MHz 的调制信号,避开了低频干扰,能够对快速的相位抖动做出反应,但该系统反馈腔结构复杂。电反馈技术<sup>[6]</sup>不需要大的反馈腔成本低,且不存在模式跳变现象,但激光器作为反馈回路的一部分,导致系统稳定性较差。2009年,加拿大 TeraXion 公司的 M. Poulin 等人<sup>[7]</sup>,使用相移光纤光栅作为鉴频器,替代光学反馈腔,反馈的误差信号作用于激光器的驱动模块,成功将激光器的线宽压缩到千赫兹的量级,但激光器本身作为反馈回路的一部分。

光反馈技术与电反馈技术在压缩激光器线宽过程中,易受噪声消减带宽、稳定性和速度的影响,且反馈回路不具有独立于激光源工作的特点,导致系统稳定性较差。因此,近年来人们提出了一种前馈技术<sup>[8-10]</sup>,压缩激光器线宽。文中在前馈技术基础上,采用相位调制与单边带调制相结合的方法,可以减小小激光器相位噪声(FM 噪声),得到线宽压缩的激光信号。

## 1 基于单边带调制的前馈技术压缩激光器线宽的原理

### 1.1 基本原理框图

图 1 为基于单边带调制的前馈技术压缩激光器

线宽的原理框图。激光器的输出信号经 50/50 的耦合器后分成功率相等的两束,一束进入相位噪声检测系统,使用非平衡马赫增德尔干涉仪(MZI)提取出光信号的频率误差信号,探测器和放大器共同作用将频率误差信号转变成相应的电压信号,误差电压信号驱动压控振荡器(VCO)工作实现线性调频,输出的射频调制信号进入双平衡马赫曾德单边带调制器。同时,耦合器输出的另一束光经单模光纤连接到电光单边带调制器,通过电光单边带调制(EO-SSB)消除激光器的相位噪声压缩线宽。

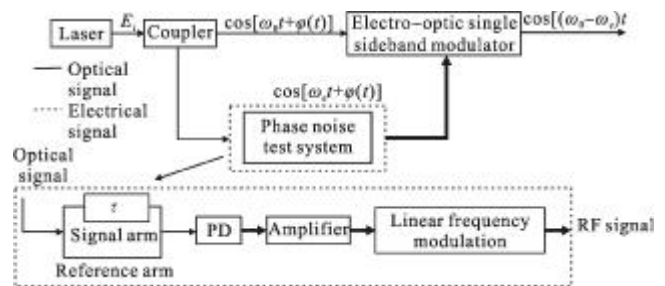


图 1 前馈技术压缩激光器线宽原理框图

Fig.1 Conceptual block diagram of a feed-forward compression laser line width

基于前馈技术压缩激光器线宽的作用对象是激光器的输出信号,因此,将激光器的输出信号作为系统输入信号,假设输入信号电场表达式为  $E_i = A_1 \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$ ,经 3 dB 耦合器后进入上下两条支路。上支路用于提供光载波信号,下支路即前馈支路,可以得到含有激光器相位噪声的射频调制信号。当 MZI 信号臂实现  $90^\circ$  相移,即满足  $\omega_0 \tau = \pi/2$  时,MZI 和探测器(PD)通过鉴频完成激光器相位噪声的提取。经 MZI 作用后输出的光信号可表示为:

$$E_{\text{MZI}}(t) = \frac{A_1^2}{32} \{ \cos[2\omega_0 t - \omega_0 \tau + \varphi(t) + \varphi(t - \tau)] + \cos[\omega_0 \tau + \varphi(t) + \varphi(t - \tau)] \} \quad (1)$$

该信号经光电探测器后变为电信号,并只保留低频部分,因此光电探测器的输出信号表示为:

$$i_{\text{PD}}(t) = \frac{R}{32} A_1^2 \cos[\omega_0 \tau + \varphi(t) + \varphi(t - \tau)] \approx \frac{R}{32} A_1^2 \tau \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (2)$$

式中:R 为光电探测器的响应度;A<sub>1</sub> 为光信号振幅;φ(t) 为光信号相位噪声;τ 为非平衡 MZI 两臂的延时差。放大器将光电探测器输出的电流 i<sub>PD</sub>(t) 转化成电压,即 V<sub>ctrl</sub> = K i<sub>PD</sub>(t),K 为放大器的电压增益。V<sub>ctrl</sub> 作为 VCO 的控制电压驱动压控振荡器工作。理想 VCO

的线性调频表达式为  $\omega_V = \omega_e + K_V V_{ctrl}$ , 其中  $K_V$  为 VCO 的增益,  $\omega_e$  为 VCO 的固有频率。根据振荡器频率与相位的关系  $\omega_V = d\varphi/dt$ , 振荡器的相位可表示为:

$$\varphi_V(t) = \int_0^t \left[ \omega_e + K_V \frac{RA_1^2 \tau}{32} \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] dt \quad (3)$$

由公式(3)计算出含有激光器相位噪声的射频电压信号, 该信号可表示为:

$$V_{RF} = A \cos \left\{ \int_0^t \left[ \omega_e + K_V \frac{RA_1^2 \tau}{32} \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] dt \right\} \quad (4)$$

式中:  $A$  为 VCO 的射频输出电压幅值。当放大器的增益与压控振荡器的增益满足  $KK_V = \frac{32}{RA_1^2 \tau}$  时, 代入

公式(4)可得:

$$V_{RF} = A \cos[\omega_e t + \varphi(t)] \quad (5)$$

压控振荡器的输出射频电压驱动强度调制器, 用射频信号调制自由运行的激光器信号, 调制后输出两种频率的变频信号, 即和频  $\omega_0 + \omega_e$  与差频  $\omega_0 - \omega_e$ , 输出光信号的电场表达式为:

$$E_0(t) = \frac{A_1}{2} \cos[\omega_e t + \varphi(t)] \times A \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] = \frac{A_1 A}{4} \{ \cos[(\omega_0 + \omega_e)t + 2\varphi(t)] + \cos[(\omega_0 - \omega_e)t] \} \quad (6)$$

由公式(6)可以看出, 和频分量的相位噪声为自由运行激光器相位噪声的两倍, 差频分量的相位噪声完全消除。通过电光单边带调制只保留低频分量, 即可得到线宽压窄的激光信号。

### 1.2 双平衡马赫曾德单边带调制器

图 2 为电单边带调制的原理框图, 主要由两个乘法器和一个加法器组成。输入信号  $m(t)$  经希尔伯特变换后, 所有频率成分幅度不变、相移  $\pi/2$  得到  $\hat{m}(t)$ 。  $\cos\omega_c t$  经相移后得到  $\sin\omega_c t$ , 这两个正交的余弦信号用于消除高频分量、保留低频分量从而得到单边带调制信号。图 3 为电光单边带调制<sup>[11-12]</sup>的原理框图,

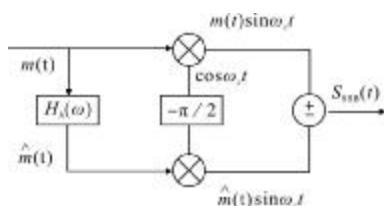


图 2 电单边带调制原理图

Fig.2 Block diagram of electric single-sideband modulation

图中实线代表主 MZM, 虚线代表子 MZM。在一个主 MZM 的两平衡臂中分别嵌入两个子 MZM (相当于图 2 中的两个乘法器)。两个正交的射频信号分别驱动两个子平衡 MZM 实现抑制载波的双边带调制。为了最终实现单边带调制, 要求驱动子 MZM 两臂的射频电压频率相同相位相差  $180^\circ$ , 两个子 MZM 的输出信号相位差保持  $-90^\circ$ 。常用的 EOM 调制器是马赫曾德调制器(MZM), 双平衡马赫曾德单边带调制器采用两个 MZM 的结构, 通过对信号的相位调制得到强度调制信号。图 3 中(a)、(b)、(c)、(d)点的调制电压分别为  $\cos(\omega_e t)$ 、 $\cos(\omega_e t + \pi)$ 、 $\cos(\omega_e t + \pi/2)$ 、 $\cos(\omega_e t + 3\pi/2)$ , 各点调制后的频谱如图 4 所示。

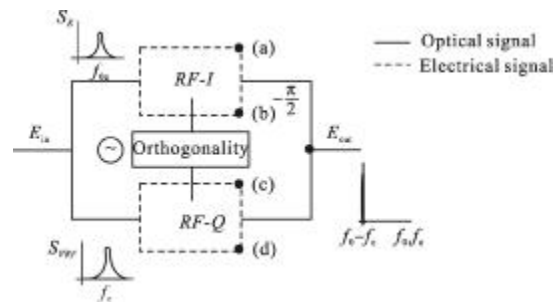


图 3 电光单边带调制原理图

Fig.3 Block diagram of electro-optics single-sideband modulation

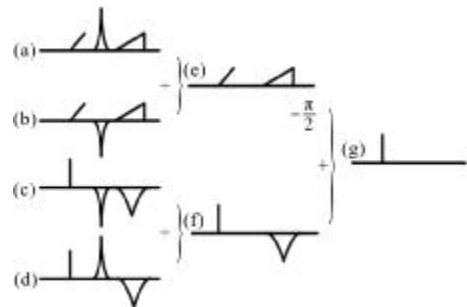


图 4 电光单边带调制在复平面的频谱图

Fig.4 Spectrum of single-sideband modulation in complex plane

子调制器中(a)点和(b)点相位调制后的结果相加得到图 4 中点(e)调制的频谱; 同理, (c)点和(d)点调制结果相加得到图 4 中点(f)的调制频谱。然后将第一个子强度调制器点(e)输出的信号相移  $-90^\circ$ , 与第二个子强度调制器点(f)处光信号合波后输出抑制载波单边带调制(SC-SSB)的信号。

## 2 实验结果与分析

实验选取常用的中心波长 1552.5 nm (193.1 THz)、功率 10 mW 的蝶形封装的分布反馈(DFB)半导体激

光器。激光器的驱动电路具有温度控制、功率控制和保护电路,保证长时间工作时激光器的稳定性。实验得到未加入前馈技术时自由运行的激光器输出频谱如图 5 所示,1 552.5 nm 中心波长处 3 dB 带宽为 0.5 nm。

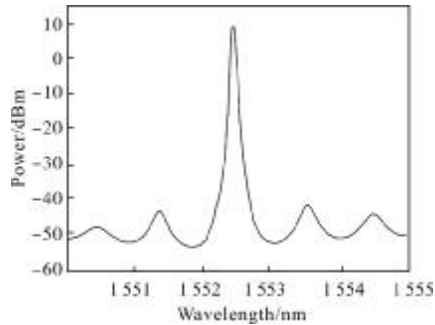


图 5 DFB 激光器的输出频谱图  
Fig.5 Output spectra of DFB laser

将实验得到的激光器的输出信号作为前馈技术压窄激光器线宽的输入信号,使用光学软件 OptiSystem 7.0 通过设定参数得到输入信号的频谱如图 6 所示。系统主要参数设置如下:LD 功率 10 mW,中心波长 193.1 THz(1552.52 nm),3 dB 带宽 0.5 nm。单模光纤的长度为 3.2 m,MZI 的延时  $\tau=1.8$  ns,放大器的增益为 80 dB,光电探测器的响应度 0.9 A/W,压控振荡器的灵敏度为 60 MHz/V。加入基于单边带调制的前馈技术后信号的输出频谱如图 7 所示,对两频谱图进行对比分析。

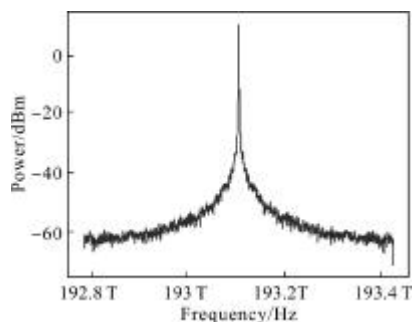


图 6 未加入前馈线宽压缩系统时 LD 的输出频谱图  
Fig.6 Output spectra without feed-forward line width compression technology

加入基于单边带调制的前馈线宽压缩系统后激光器的线宽为 0.016 nm,可见激光器的线宽压缩了约 30 倍。通过基于单边带调制的前馈技术,减小了激光器的相位噪声,稳定激光器的中心频率,从而得到窄线宽的激光器信号。

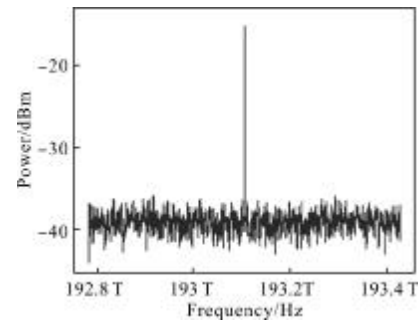


图 7 加入前馈线宽压缩系统后激光器的输出频谱图  
Fig.7 Output spectra with feed-forward line width compression technology

理论推导中,假设输入马赫曾德干涉仪的光信号、射频信号均是理想信号。所以,得到单边带调制的结果中,差频分量的相位噪声完全消除。实际,在仿真系统的搭建过程中,各器件均模拟实际器件工作,存在随机噪声,以致输出激光的线宽并不能达到它的极限线宽,即仅由自发辐射而引起的极窄的线宽。如光电探测器参数设定中,响应度为 0.9 A/W,完成光电转换的过程中,不仅给出了被测激光器相位的有用信号,同时也伴随着噪声。此外,放大器、压控振荡器均不是理想器件。这些非理想情况会导致激光器的相位噪声无法完全消除,因而调制后输出激光器的线宽压缩程度受到限制。

### 3 结论

激光器的相位噪声是造成输出线宽加宽的主要原因,为此,文中提出一种有效降低激光器相位噪声的方案压窄半导体激光器线宽—基于单边带调制的前馈技术。通过将激光器的频率浮动信号转变成电压信号调制自由运行的激光信号实现激光器线宽的压窄。高品质的半导体激光器在相干光通信、高分辨率光谱仪等干涉传感领域具有广泛的研究前景,因此对超低噪声、极窄线宽的半导体激光器的研究具有重要的研究价值。

### 参考文献:

- [1] Ohtsu M, Murata M, Kourogi M. FM Noise reduction and subkilohertz line width of an AlGaAs laser by negative electrical feedback [J]. Quantum Electron, 1990, 26: 231 - 241.
- [2] Zhou Huijuan, Chen Mo, Yao Qiong, et al. Characteristics of

- distributed feedback semiconductor laser injection locking and applications to optical fiber sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0705002. (in Chinese)
- 周会娟, 陈默, 姚琼, 等. 分布反馈半导体激光注入锁定及其光纤传感应用[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0705002.
- [3] Chen Xuzhong, Yao Jiliang, Li Yiming, et al. A narrow linewidth diode laser for high resolution spectroscopy and its properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(10): 1383-1388. (in Chinese)
- 陈徐宗, 姚继良, 李义民, 等. 用于高分辨光谱研究的窄线宽半导体激光器及其特性研究 [J]. *光学学报*, 1996, 16(10): 1383-1388.
- [4] Huang Kaikai, Li Nan, Lu Xuanhui. 894 nm external cavity diode laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2130-2133. (in Chinese)
- 黄凯凯, 李楠, 陆璇辉. 894 nm 外腔半导体激光器 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2130-2133.
- [5] Jiang Xiao, Zhang Chen, Cai Wenqi, et al. Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 82-86. (in Chinese)
- 江晓, 张晨, 蔡文奇, 等. 冷原子实验用的半导体激光器稳频系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 82-86.
- [6] Yuan Qiping, Zheng Tianmei, Tong Zhengrong, et al. Narrow linewidth semiconductor lasers based on electrical feedback[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051402. (in Chinese)
- 袁其平, 郑甜美, 童峥嵘, 等. 基于电反馈方法的窄线宽半导体激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051402.
- [7] Poulin M, Abotte S, Bain A, et al. Low noise semiconductor laser for optical fiber sensing [C]//20th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009.
- [8] Firooz A. Design methodology and architectures to reduce the semiconductor laser phase noise using electrical feed-forward schemes [J]. *IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, 2010, 58(11): 3290-3303.
- [9] Firooz A, Hossein H. Wideband tunable laser phase noise reduction using single sideband modulation in an electro-optical feed-forward scheme[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 196-198.
- [10] Firooz A, Hossein H. Light source independent line width reduction of lasers [C]//Conference on Optical Fiber Communication, 2012.
- [11] Shimotsu S, Oikawa S, Saitou T, et al. Single side-band modulation performance of a LiNbO<sub>3</sub> integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(4): 364-366.
- [12] Li Jianqiang. Photonic processing techniques of microwave signals and millimeter-wave band ROF system design based on lithium niobate modulators[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 24-30. (in Chinese)
- 李建强. 基于铌酸锂调制器的微波光电子信号处理技术与毫米波段 RoF 系统的设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009: 24-30.