

用注入锁模法改善 DFB 激光器的频率响应^{*}

张 韬 伞海生 温继敏 刘 宇 刘 超 陈 伟 谢 亮 祝宁华[†]

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 验证了通过注入锁模方法,分布反馈(DFB)半导体激光器的频率响应可以得到明显的改善. 实验中通过一个环形器,将主激光器的输出光注入到从激光器. 测量了从激光器在有注入光 and 没有注入光时的光谱和频率响应. 发现在不同的注入光强度和波长下,激光器的调制带宽和弛豫振荡峰频率会发生变化. 通过适当选择注入光的强度和波长,频率响应可以得到改善. 激光器频率响应的改善可以用两个模式的拍频来解释,一个模式是从激光器的主模,另一个是主激光器的模式,该模式与从激光器的边带重合. 该理论与实验结果符合得很好.

关键词: 注入锁模; 分布反馈式半导体激光器; 直接调制; 频率响应; 外光注入; 模拍频理论

EEACC: 4320J; 4330

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)08-1463-04

1 引言

高速直接调制激光器是大容量光通信系统的核心技术之一. 如何改善激光器的频率响应是高速直接调制激光器的核心问题. 改善激光器频率响应的方法主要是缩短激光器的腔长,缩小激光器电极的尺寸,但这种频率响应的改善是很有限的. 为了保持激光器具有一定的输出光功率,需要增大激光器的驱动电流. 可是驱动电流的增大会带来一系列的问题,例如响应线性度变差、寿命缩短、稳定性差等. 近年来,注入锁模方法受到广泛的关注,科研人员在理论和实验的很多方面对其进行了研究. 注入锁模方法是指用一个窄线宽激光器发射的激光注入锁定另一个激光器,改善后者的频率调制特性;前者称为主激光器,后者称为从激光器. 注入锁模可以增大激光器的调制带宽,改善激光器的啁啾特性,减少激光器的非线性效应^[1-11]. 理论研究表明,注入锁模能增大激光器的 3dB 调制带宽^[1,3]. 在实验中,随着注入光强度的增加,观测到弛豫振荡峰向高频方向移动,但是由于激光器内部寄生参数的影响,低频部分的频率响应容易降到 -3dB 以下,也就不能够增大激光器的 3dB 调制带宽^[4-8]. 最近的一项研究^[5]表明,注入锁模 DFB 激光器的本征带宽可以达到甚至超过 35GHz,接近由 K 因子决定的直接调制 DFB 的极限带宽. 但在实验中,Lu 等人^[6]利用注入锁模方法,将 DFB 的 3dB 调制带宽从 6GHz 增大到 11GHz,这是到目前为止报道过的最好的结果.

我们使用相对简单的实验装置,将一个可调谐激光器发射出的激光注入到一个分布反馈(DFB)激光器,观察到 DFB 激光器的本征调制带宽显著增大,弛豫振荡峰的频率向高频方向移动,频率响应曲线变得平坦. 适当选择注入光的光强和频率,可以改善 DFB 激光器的频率响应. 我们还测量了有注入和无注入时的光谱,测量了注入光的微波频谱,激光器频响曲线随注入光波长的变化,这两方面的内容均属首次报道.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 采用 Agilent 公司生产的 8164A 可调谐激光器作为主激光器,发出的窄线宽连续激光通过环行器后,注入到一个 DFB 激光器. 环形器需要低的插入损耗,高的隔离率和低的偏振依赖. 实验中作为从激光器的 DFB 激光器的阈值

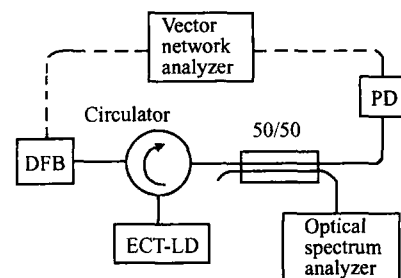


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

^{*}国家自然科学基金资助项目(批准号:60510173,60536010,60506006)

[†]通信作者. Email: nhzhu@semi.ac.cn

2006-01-16 收到,2006-03-27 定稿

电流是 15mA,在偏置电流为 40mA 时输出功率为 2mW,中心波长为 1542.35nm. DFB 激光器的工作温度和偏置电流都通过激光器驱动电源稳定地控制. DFB 激光器发出的光通过环形器,注入到 40GHz 的高速探测器,转化为电信号. Agilent 8722A 网络分析仪的一个端口与 DFB 激光器相连,提供调制信号,另一端口与探测器相连. 我们也将 DFB 激光器发出的光输入光谱仪中分析其光谱.

3 结果与讨论

实验中我们通过调节注入光的波长,观察在不同注入光波长下 DFB 激光器频率响应和光谱的变化,证实注入光的波长比 DFB 激光器的波长长 0.1nm 的时候,注入锁模现象最为明显,频率响应也获得最大的改善. 图 2 是 DFB 激光器在偏置电流为 40mA,注入光强度为 2dBm,注入波长比未注入时 DFB 激光器的主峰波长 0.1nm 时测得的光谱. 之所以设 DFB 激光器的偏置电流为 40mA,是因为这时激光器的 3dB 调制带宽最宽,频率响应特性曲线最为平坦,预计注入锁模之后可以得到更好的频率响应特性. 从图中可以看出,在 12.5GHz 的调制频率下,DFB 激光器的光谱展宽,并且产生了一系列边带. 主峰和最靠近的边带之间的频率差为 12.5GHz. 注入光的波长非常接近 DFB 光谱的一个边带的波长时,DFB 激光器的主模移动到该边带处,和注入光的波长重合. 此时,激光器的主模光功率减小了 1dB,而边带的光功率显著增加;载流子和光子之间的耦合状况变得更好,也就改善了频率响应特性.

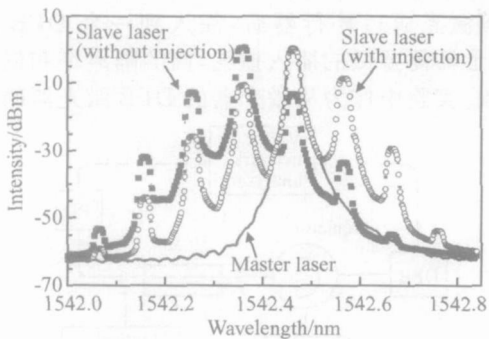


图 2 12.5GHz 调制频率下 DFB 激光器在有注入和无注入时的光谱

Fig. 2 Optical spectra of the DFB laser with and without injection under a modulation frequency of 12.5GHz

实验中我们观察到,通过调节注入光的强度,不但可以大大提高 DFB 激光器的 3dB 带宽,还可以使得 DFB 激光器的弛豫振荡峰的频率向高频方向

移动,使频率响应曲线变得平坦. 图 3 是在无光注入和不同功率连续光注入下 DFB 激光器的频率响应变化的情况. 从图中来看,注入锁模时激光器频率响应的改善非常明显. 在无光注入时,DFB 激光器的调制带宽为 11.8GHz,弛豫振荡峰的频率为 8.5GHz,在注入锁模时,弛豫振荡峰的频率为 10GHz 左右. 当注入光强为 0,2 和 3dBm 时,DFB 激光器的调制带宽分布增大到 16,16.2 和 16.5GHz.

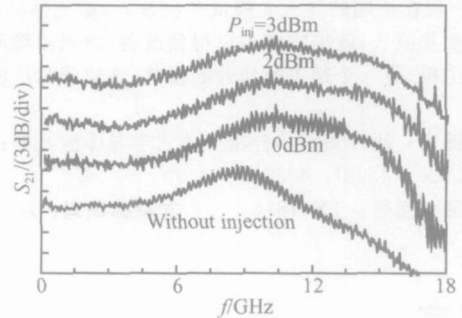


图 3 DFB 激光器在未注入和不同注入光功率下的频率响应
Fig. 3 Frequency responses of DFB laser for various injection optical powers as well as free running laser

在实验中,DFB 激光器主模的波长与注入光的波长相差 0.1nm,两者拍频产生的电磁波频率约为 12.5GHz,当外加 12.5GHz 左右的调制信号时,拍频信号使得调制信号得到增强,这个现象可以用模拍频理论^[12]来解释. 模拍频理论最初是用来解释两段式激光器可以产生特定频率的微波信号,我们用该理论来解释 DFB 激光器频率响应的改善. 由于注入光和激光器的主模都具有一定的线宽,从而 DFB 激光器在 12.5GHz 附近的频率响应得到了改善. 从图 3 中也可以清楚地看到这一点,也就是说,选择主激光器的光波长可以有目的地改善从激光器的频率响应,使得从激光器的频率响应曲线变得平坦,并不会改变从激光器的频率响应幅度.

为了验证上述假设,在从激光器没有加调制的情况下,用探测器接收其出射光,再将探测器的电输出接入微波频谱仪测量其频谱,见图 4. 频谱实际上反映的是激光器不同模式相互之间的拍频. 此时主从激光器之间的波长差为 0.1nm,注入光的强度为 0dBm. 频谱上有两个峰,第一个峰出现在 12.5GHz 左右,是主激光器的主模和从激光器的主模拍频所产生的微波脉冲. 第二个峰出现在 25GHz 左右,由两个部分组成,一部分是主激光器的主模和从激光器的主模发生四波混频,混频后的模式与原来的模式拍频所产生的微波脉冲;另一部分是 12.5GHz 微波的二次谐波. 由于发生了四波混频和二次谐波,第二个峰值的频率为第一个峰的两倍. 用周期性的正

弦信号调制从激光器时,其对应频谱峰值附近的频率响应会得到改善.

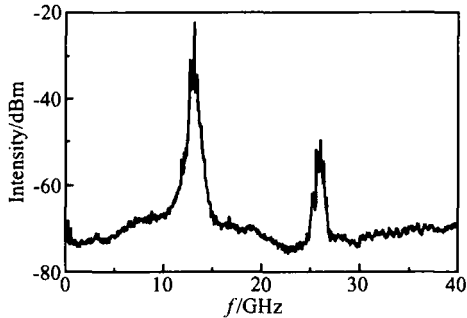


图 4 未加调制的注入锁模激光器的频谱

Fig. 4 Frequency spectrum of the injection-locked laser without modulation

我们调节主激光器的波长,观察从激光器频率响应的变化.如图 5 所示,主激光器的出射光强度为 0.5mW,从激光器的偏置电流为 30mA.从图中可以看出,未注入时弛豫振荡频率为 7GHz 左右.注入光波长差为 0.04nm 时,响应的峰值频率为 14GHz;注入光波长差为 0.08nm 时,响应的峰值频

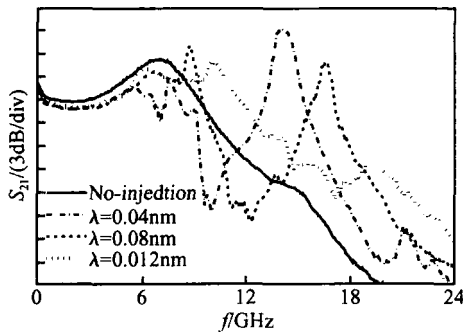


图 5 DFB 激光器在未注入和不同注入光波长下的频率响应

Fig. 5 Frequency responses of DFB laser for various injection optical wavelengths as well as free running laser

率为 16GHz.当波长差为 0.12nm 时,从激光器频率响应曲线的峰值出现在 11 和 20GHz 两个位置.随着主激光器和从激光器的出射光波长差的增大,从激光器的频率响应峰值向高频方向移动.这是由于波长差的增大导致了主从激光器模式之间拍频产生的电磁波频率增大,从而相应的调制信号的响应得到了增强.我们也注意到,拍频电磁波频率与调制信号响应的峰值频率并非完全一致,这是由于光注入现象涉及到一系列复杂的效应,包括光载流子数目的增加,有源层折射率的改变,有源层电子数的变化,以及激光器的弛豫振荡效应等等,所有这些现象都会影响到激光器的频率响应.但是从频率响应曲线的整体趋势上看,模式拍频效应的影响还是很大

的.

通过改变 DFB 激光器的偏置电流,注入光的波长和注入光强,可能会得到更好的频率响应特性.我们也研究过光注入 DFB 激光器的相频特性,发现并无明显改变.

4 结论

本文利用注入锁模方法,在不增大偏置电流的情况下,通过调节注入光的光强和波长,改善了激光器的频率响应.由于直接调制激光器是二端口器件,而注入锁模激光器是三端口系统,系统的参数可以有更多的选择和调整余地,所以注入锁模方法可以在很多方面避免直接调制激光器的不足.

我们的实验中,通过注入锁模方法,改善了 DFB 激光器的频率响应.将注入锁模法应用于高速光纤通信系统中,可以显著提高系统的性能.随着通信技术的发展,注入锁模方法可能成为实现宽带激光器的一种具有实际应用价值、简单而有效的技术方案.

参考文献

- [1] Wang J, Haldar M K, Li L, et al. Enhancement of modulation bandwidth of laser diodes by injection locking. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8:34
- [2] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A. Small-signal analysis of modulation characteristics in a semiconductor laser subject to strong optical injection. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, 32: 1456
- [3] Simpson T B, Liu J M. Enhanced modulation bandwidth in injection-locked semiconductor lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9:1322
- [4] Meng X J, Chau T, Wu M C. Experimental demonstration of modulation bandwidth enhancement in distributed feedback lasers with external light injection. *Electron Lett*, 1998, 34 (21):2031
- [5] Hwang S K, Liu J M, White J K. 35-GHz intrinsic bandwidth for direct modulation in 1.3μm semiconductor lasers subject to strong injection locking. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16:972
- [6] Lu H H, Huang H H, Tzeng S J, et al. Employing double external light injection techniques in radio-on-fiber transport systems. *CLEO 2004*, 1:16
- [7] Lu H H, Lai P C, Tsai W S. Radio-on-multimode fiber systems based on VCSELs and external light injection technique. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16:1215
- [8] Hu Z Y, Davanco M, Blumenthal D J. Extinction ratio improvement by strong external light injection and SPM in an SOA for OTDM pulse source using a DBR laser diode. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15:1419
- [9] Mohrdiek S, Burkhard H, Walter H. Chirp reduction of directly modulated semiconductor lasers at 10Gb/s by strong cw light injection. *J Lightwave Technol*, 1994, 12:418
- [10] Yabre G, Le Bihan J. Reduction of nonlinear distortion in di-

- rectly modulated semiconductor lasers by coherent light injection. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33:1132
- [11] Yu Jinlong, Ma Xiaohong, Yang Tianxin, et al. 20GHz injecting mode locked fiber laser. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(2): 253 (in Chinese) [于晋龙, 马晓红, 杨天新, 等. 20GHz 注入锁模光纤激光器实验. *光学学报*, 2002, 22(2): 253]
- [12] Al-Mulin M. Two-section gain-coupled DFB lasers and their application for wireless networks. PhD Dissertation, University of Central Florida, 2001

Improvement of the Frequency Response of a DFB Laser Using Injection Locking^{*}

Zhang Tao, San Haisheng, Wen Jimin, Liu Yu, Liu Chao, Chen Wei, Xie Liang, and Zhu Ninghua[†]

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper reports that the frequency responses of a direct-modulated DFB laser diode can be improved using an injection locking method. In the experiments, the optical output power of the master laser is injected into the slave laser via a circulator. The optical spectra and frequency responses of the slave laser with and without injection are measured, respectively. The modulation bandwidth and the relaxation oscillation frequencies of the laser are quite different at different injection powers and wavelengths. The frequency responses can be improved by choosing the proper optical power and wavelength of injection. We believe that the improvement of the frequency response is due to a two-mode beat that includes the main mode of the slave laser and the master laser mode, which coincides with the side band of the slave laser. This theory is supported by the experiments.

Key words: injection-locking; distributed feedback laser; direct modulation; frequency response; external light injection; mode beating theory

EEACC: 4320J; 4330

Article ID: 0253-4177(2006)08-1463-04

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60510173, 60536010, 60506006)

[†] Corresponding author. Email: nhzhu@semi.ac.cn

Received 16 January 2006, revised manuscript received 27 March 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics