

文章编号: 0258-7025(2008)09-1318-05

注入锁定法布里-珀罗激光器的单模工作特性

韩 威 张雅丽 张 艳 任 民 李 亮 张红广 谢 亮 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘要 使用分布式反馈(DFB)激光器对法布里-珀罗(F-P)激光器进行单模注入锁定。通过改变 F-P 激光器的偏置电流,DFB 激光器的输出功率以及两激光器间的波长失谐量,对注入锁定 F-P 激光器的光谱特性、功率特性以及频率响应特性进行实验分析,找出影响注入锁定 F-P 激光器稳定性的因素,并测量注入锁定 F-P 激光器的稳定锁定区;通过优化注入条件实现 F-P 激光器的高边模抑制比(SMSR)输出,最高可达 55 dB;通过与自由运转 F-P 激光器比较,发现注入锁定可以明显抑制半导体激光器在高频调制下光谱的展宽。注入锁定后 F-P 激光器的 3 dB 调制带宽接近 14 GHz。实验结果表明,通过合理设计光注入条件,注入锁定技术可以明显改善 F-P 激光器的光谱特性以及高频响应特性,并在高速光纤通信领域中得到广泛应用。

关键词 激光器;光通信技术;法布里-珀罗半导体激光器;注入锁定;频率响应

中图分类号 N 248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083509.1318

Single Mode Operation of an Injection Locked Fabry-Perot Laser

Han Wei Zhang Yali Zhang Yan Ren Min

Li Liang Zhang Hongguang Xie Liang Zhu Ninghua

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

Abstract A Fabry-Perot (F-P) semiconductor laser (FP-LD) was single mode injection locked by a distributed feedback semiconductor laser (DFB-LD). The characteristics of optical spectrum, output power and frequency response were investigated by adjusting the bias current of the FP-LD, the output of the DFB-LD and the wavelength detuning between the master and the slave laser. The factors that affect the stability of injection locked FP-LD were analyzed. The stable range of injection locking was given. By optimizing the injection conditions, the side mode suppress ratio (SMSR) of the injection locked FP-LD as high as 55 dB was demonstrated. Comparing with the free running FP-LD, the injection locking technique can suppress the spread of the spectrum under high speed modulation. The 3 dB tuning bandwidth of 14 GHz was achieved. The results indicate that with injection locking the characteristic of optical spectrum and frequency response can be improved, by which the FP-LD can apply to the high speed fiber communication system.

Key words lasers; optical communication technology; Fabry-Perot semiconductor lasers; injection locking; frequency response

1 引 言

近年来,随着波分复用(WDM)、时分复用(OTDM)网络的飞速发展以及光纤到户(FTTH)网络技术的诞生,带动了高速光电子器件的不断升级

进步,如何提高器件性能以及合理优化网络结构显得尤为重要^[1~3]。在光网络中,特定波长的半导体激光器作为光传输器以及备份光源有着不可替代的优势。降低半导体激光器的成本,采用高性价比的

收稿日期:2007-11-13;收到修改稿日期:2008-01-11

基金项目:国家 973 计划(2006CB604902,2006CB302806),国家自然科学基金(60510173,60536010,60536006,60606019)和科技部重大国际合作项目(2006DFA11880)资助课题。

作者简介:韩 威(1980—),男,河北人,博士研究生,主要从事高速光电子器件的研究和设计。E-mail:whan@semi.ac.cn

导师简介:祝宁华(1959—),男,贵州人,研究员,博士生导师,主要从事光波导调制器及微波集成电路的理论与实验研究,半导体激光器和调制器组件的封装设计。E-mail:nhzhu@semi.ac.cn

器件成为降低光网络成本的一个关键因素。

近些年来利用光注入锁定技术,法布里-珀罗(F-P)激光器可以作为低成本的光传输器^[4]以及光波长路由器^[5],这吸引了很多研究者的目光并使之逐渐成为光通信领域的一个研究热点。当窄线宽的单模激光器对 F-P 激光器进行光注入时,在一定的注入条件下 F-P 激光器的输出将会被锁定在单模激光器的工作波长处。注入锁定后的 F-P 激光器呈单纵模工作并且其高频响应特性得到改善。

本文使用分布式反馈(DFB)激光器(主激光器)对 F-P 激光器(从激光器)进行注入锁定。实际测量了注入锁定 F-P 激光器的光谱、光功率以及频率响应曲线。通过调节 DFB 激光器的输出功率, F-P 激光器的偏置电流以及两激光器间的波长失谐量,分析了注入锁定 F-P 激光器的静态工作特性和高速调制特性。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中主从激光器分别为 DFB 激光器和 F-P 激光器,阈值电流分别为 9 mA 和 15 mA。由于使用了具有均匀光栅的折射率耦合型 DFB 激光器,以布拉格波长为中心会存在一个模阻止带,其宽度约为 320 GHz。F-P 激光器的模式间距约为 180 GHz。为了避免注入光反射回 DFB 激光器,在环行器(Circulator)和 DFB 激光器间插入光隔离器(Isolator);同时为了调整注入光的偏振态,在注入端使用了偏振控制器(PC)。输出光经耦合器分成两路,一路光经高速光探测器(PD) HP11982A 后转化为电信号输入进矢量网络分析仪(NVA) Agilent 8720D;另一路光进入光谱分析仪(OSA) Advantest 8384。

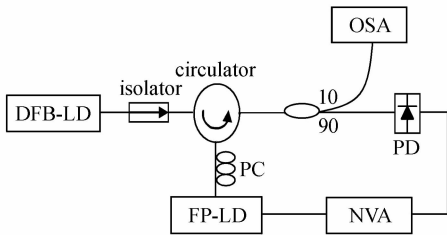


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与分析

3.1 注入锁定 F-P 激光器静态特性

为了进行比较,图 2 显示了注入锁定前后 F-P

激光器的输出光谱,曲线 1 表示注入锁定前的多模激射谱,曲线 2 表示注入锁定后的单模激射谱。其中 F-P 激光器与 DFB 激光器的偏置电流分别为 30 mA 和 50 mA,输出功率分别为 1.2 dBm 与 3.8 dBm。通过调节 DFB 激光器的工作温度使其波长输出在 1570.14 nm 处,并选择 F-P 激光器 1570 nm 处模式进行注入,波长失谐量为 0.14 nm。从锁定后的光谱可以清楚看到, F-P 激光器经注入锁定后呈单纵模输出,边模抑制比(SMSR)可以达到 55 dB。其中原 F-P 激光器的主模受到的抑制最大,达到了 50 dB。注入锁定后被注入模式红移到 1570.14 nm 处并成为主模,其模式输出功率较注入前增大了约 5 dB。

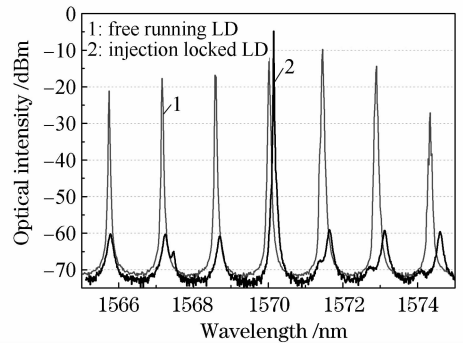


图 2 注入前后 F-P 激光器的输出光谱

Fig. 2 Optical spectrum of the F-P-LD with and without injection locking

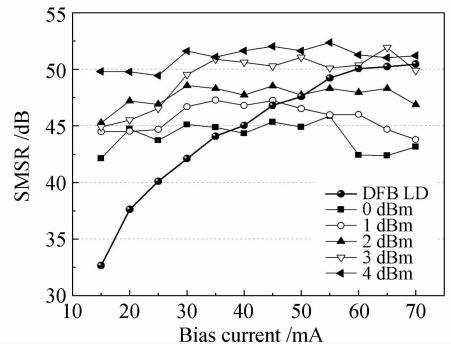


图 3 不同主激光器输出功率下注入锁定 F-P 激光器 SMSR 随其偏置电流的变化关系

Fig. 3 Measured SMSR of the injection locked F-P-LD as a function of the bias current with the DFB-LD's output as a parameter

图 3 为在不同偏置电流下,注入锁定 F-P 激光器输出光谱的 SMSR 随主激光器输出功率的变化情况,同时也给出了不同偏置电流下主激光器输出光谱的 SMSR。可以看出随主激光器输出功率的增加,单模工作 F-P 激光器的 SMSR 逐渐增大。还可以看出 F-P 激光器的偏置电流对注入锁定后的稳

定性有很大影响。在偏置电流小于25 mA和大于55 mA的区域内,输出光谱的 SMSR 起伏较大并出现不同程度的降低,说明在这个区域内注入锁定的稳定性变坏。

图4为注入锁定 F-P 激光器在不同偏置电流和主激光器输出强度下的光功率曲线,其中波长失谐统一为0.14 nm。为了更加直观地表现器件特性以及光功率曲线细节上的差异,图中以归一化输出功率为指标。无注入时 F-P 激光器的阈值电流为15 mA。图4(a)中的插图给出了 $P-I$ 曲线在15 mA以下的细节部分。可以看出随 DFB 激光器输出光功率的增大,注入锁定 F-P 激光器 $P-I$ 曲线的斜率逐渐增大,并且 $P-I$ 曲线上没有出现明显的阈值拐点。还可以看出,当 DFB 激光器输出光功率为4 dBm以及 F-P 激光器的偏置电流为20 mA时,输出光功率曲线的起伏很大,这表明随 DFB 激光器输出光功率的增大或 F-P 激光器偏置电流的减小,光功率曲线的线性度都会变坏。可见两激光器相对输出状态对注入锁定后的稳定态影响很大,合理设计注入条件显得尤为重要。

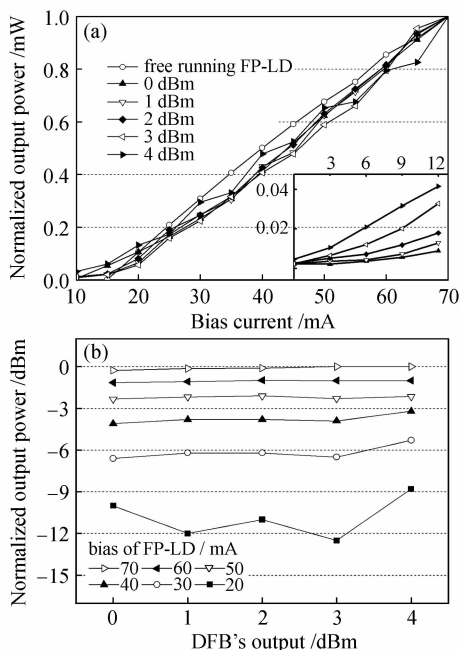


图4 注入锁定后 F-P 激光器的输出功率与偏置电流(a)及 DFB 激光器输出功率(b)的关系

Fig. 4 Measured normalized output power as a function of the bias current (a) and the output power of the DFB LD (b)

3.2 注入锁定 F-P 激光器高频调制特性

半导体激光器的光注入存在一个稳定的注入锁定区域,该区域由主从激光器间的频率失谐量和主

激光器输出光功率决定。当主从激光器的相对状态满足该区域的要求时,就会发生稳定的注入锁定,从而改善从激光器的光功率特性以及高频响应特性。图5显示了 F-P 激光器在40 mA偏置电流下的稳定锁定区。当 DFB 激光器输出功率由0增加到4 dBm时,稳定锁定区的上边界从-7.2 GHz移动到-10.4 GHz,下边界由-18.5 GHz移动到-27 GHz,相应的注入锁定范围增加了5.3 GHz。可以看出随 DFB 激光器输出功率的增加稳定锁定区逐渐增大,并且所允许的失谐量也会增大。

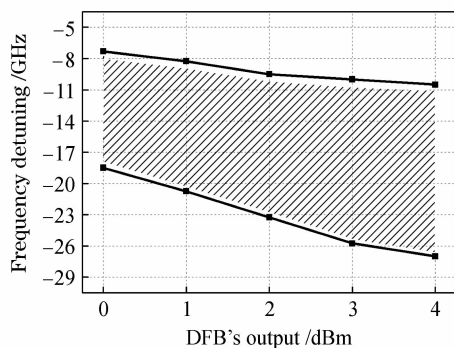


图5 稳定的注入锁定区

Fig. 5 Measured stable injection locking region

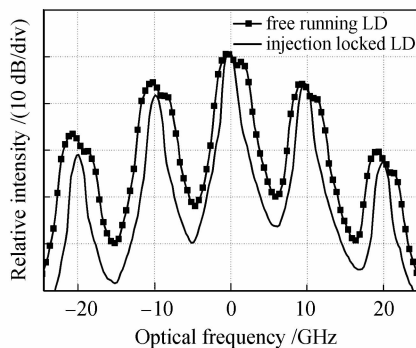


图6 10 GHz 直接调制下注入锁定前后 F-P 激光器的光谱

Fig. 6 Measured spectrum with and without injection locking under 10 GHz directly modulation

图6为注入锁定前后,F-P 激光器在10 GHz信号直接强度调制下的光谱,其中 F-P 激光器的偏置电流为40 mA,DFB 激光器的输出功率为0,波长失谐为0.14 nm。在10 GHz的调制频率下激光器光谱发生展宽,并出现一系列调制边带,相邻调制边带的频率间隔为10 GHz^[6]。可以看出,注入锁定可以明显抑制强度调制后光谱的展宽并减小相应的动态线宽,使得 F-P 激光器的高频响应特性得以改善。

图7为不同波长失谐和 DFB 激光器输出功率时注入锁定 F-P 激光器的频率响应曲线,其中 F-P

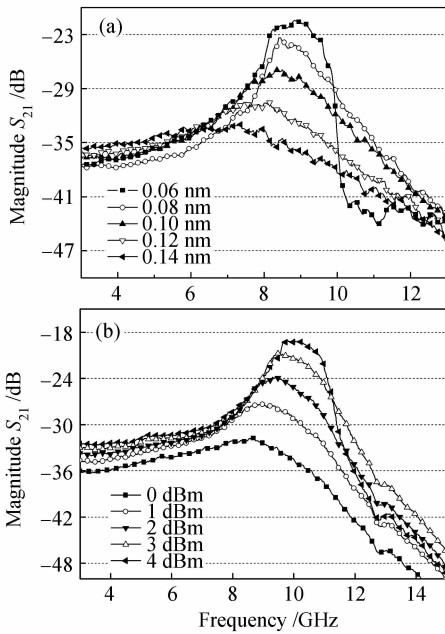


图7 频率响应与波长失谐(a)及主激光器输出(b)的关系

Fig. 7 Measured magnitude S_{21} as a function of the wavelength detuning (a) and the DFB's output (b)

激光器的偏置电流为40 mA。图7(a)中DFB激光器输出功率统一为0,当波长失谐从0.06 nm增加到0.14 nm时(对应频率失谐由-7.5 GHz增加到-17.5 GHz),注入锁定后F-P激光器张弛振荡峰的位置向高频方向移动了约1.5 GHz,同时张弛振荡峰的强度增加了约13 dB。图7(b)为0.14 nm波长失谐下(对应-17.5 GHz频率失谐),频率响应随DFB激光器输出功率的变化。可以看出当DFB激光器输出功率从0增加到4 dBm时,张弛振荡峰向高频方向移动了约2 GHz,同时其强度增加了约13 dB。总结得出:在图5所示的注入锁定区内,当主从激光器的失谐量减小时张弛振荡峰会向高频方向移动,对应3 dB带宽也随之增加,同时张弛振荡峰的强度也会增强;当主激光器的输出功率增加时,器件的频率响应变化与减小失谐量所引起的变化规律相同。实验中还发现过小的波长失谐量会导致注入锁定F-P激光器频率响应的恶化。如图7(a)所示,当波长失谐为0.06 nm时F-P激光器的高频特性恶化,在曲线上表现为10 GHz频率附近的响应急剧下降。从注入锁定的状态转变角度考虑:对应图5可以看出该失谐位置正对应稳定锁定区的上边界,当波长失谐进一步减小时注入锁定将由稳定的锁定态向自持振荡态转变^[7],同时光谱显示模式经自持振荡频率调制后输出。这时频率响应曲线呈双张弛振

荡峰,增加的峰值位置对应自持振荡的频率。由于注入锁定边界态的影响使得F-P激光器的高频特性变坏,因此需要结合具体情况来选择波长失谐量,且波长失谐要使F-P激光器保持在稳定的注入锁定态,以防止自持振荡的发生。

图8比较了F-P激光器在不同偏置电流下注入锁定前后的频率响应曲线,其中波长失谐为0.08 nm,DFB激光器输出功率为0。可以看出注入锁定明显改善了F-P激光器原有的响应特性,当偏置电流为50 mA时,注入锁定后张弛振荡峰的频率为11 GHz,与注入前相比增加了约2 GHz,相应的3 dB带宽也增加到13.8 GHz。

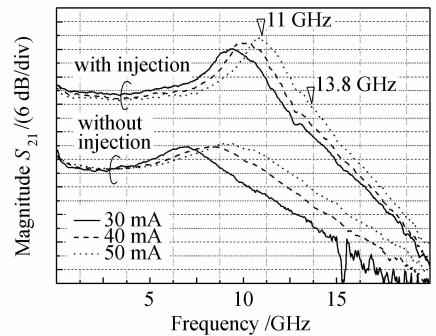


图8 注入锁定前后F-P激光器频率响应的比较
Fig. 8 Measured magnitude S_{21} of the FP-LD with and without injection locking

4 结 论

分析了不同光注入条件(DFB激光器输出功率, F-P激光器的偏置电流, 波长失谐)下注入锁定F-P激光器的静态光功率特性, 实际测量出了注入锁定F-P激光器的稳定锁定区, 并对注入锁定F-P激光器的高频响应特性进行了实验分析。实验发现主从激光器间的相对状态对F-P激光器注入锁定影响很大, 合理优化注入参数显得尤为重要。通过注入锁定, F-P激光器的高频调制特性得到极大改善。注入锁定可以抑制高频调制后光谱的展宽, 并增加F-P激光器的调制带宽。经优化的注入锁定F-P激光器, 其输出SMSR最高为55 dB, 3 dB调制带宽达到14 GHz。作为低成本的光传输器以及波长路由, 注入锁定F-P激光器会在高速光通信网络中发挥更大的作用。

参 考 文 献

- Hu Hao, Yu Jinglong, Zhang Litai *et al.*. 10 GHz short optical pulses source with ultra-low jitter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(9):1241~1244

- 胡 浩,于晋龙,张立台等. 10 GHz 超低抖动光短脉冲源[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1241~1244
- 2 Quan Shuang, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 40 Gb/s clock recovery based on optical phase-locked loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1382~1386
- 权 爽,姚敏玉,张洪明等. 利用光锁相环路实现 40 Gb/s 时钟恢复[J]. 光学学报, 2007, **27**(8):1382~1386
- 3 Yanfu Yang, Caiyun Lou, Yizhi Gao *et al.*. Demonstration of a 16×10-Gb/s OTDM system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5):264~266
- 4 Norio Kashima. Dynamic properties of F-P-LD transmitters using side-mode injection locking for LANs and WDM-PONs [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(8):3045~3058
- 5 P. K. Alex Wai, Lixin Xu, Kevin L. F. Lui *et al.*. A minimalist approach to all-optical packet switching [J]. *Optics & Photonics News*, 2005, **16**(3):34~39
- 6 Zhang Tao, San Haisheng, Wen Jimin *et al.*. Improvement of the frequency response of a DFB laser using injection locking [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, **27**(8):1463~1466
- 张 韬,伞海生,温继敏等. 用注入锁模法改善 DFB 激光器的频率响应[J]. 半导体学报, 2006, **27**(8):1463~1466
- 7 Valerio Annovazzi-Lodi, Alessandro Sciré, Marc Sorel *et al.*. Dynamic behavior and locking of a semiconductor laser subjected to external injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(12):2350~2357

《中国激光》“激光加工”专题征稿启事

激光加工技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于 2008 年 11 月正刊上推出“激光加工”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧蚀与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

截稿日期:2008 年 9 月 15 日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:mayi@siom.ac.cn(主题标明“激光加工”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请发邮件至 mayi@siom.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部