

光注入条件下分布反馈半导体激光器的放大特性研究及其在微波信号产生中的应用

熊锦添 王 荣 蒲 涛* 卢 麟 方 涛 魏志虎 郑吉林 项 鹏

(中国人民解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 选用不带内部隔离器的普通商用分布反馈式(DFB)半导体激光器作为从激光器,用一个经马赫-曾德尔外调制器进行奇数阶边带抑制调制的光信号作为探测信号,通过测量不同失谐频率条件下从激光器输出光信号经光电探测器检测所得的射频信号的功率,对光注入条件下 DFB 激光器的放大特性进行了研究,得到了不同注入功率比条件下 DFB 激光器的放大特性曲线。同时研究了一 2 级边带得到最大放大时的最佳失谐频率以及不同注入功率比条件下探测光信号的载波和一 2 级边带分别得到的增益。利用 DFB 激光器对探测光一 2 级边带的放大作用,得到了高边带抑制比的单边带信号,产生了二倍频本地振荡信号的微波信号。这为用光学方式产生高频微波信号提供了一种新的方法。

关键词 激光器;放大;光注入;微波

中图分类号 TN365 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0614002

Amplification Properties of a Distribution Feedback Semiconductor Laser under Optical Injection and Its Application in Generating Microwave Signals

Xiong Jintian Wang Rong Pu Tao Lu Lin Fang Tao Wei Zhihu
Zheng Jilin Xiang Peng

(College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract An standard commercialized fiber-pigtailed distribution feedback (DFB) semiconductor laser without internal isolator is chosen as the slave laser to study the amplification properties of a semiconductor laser under optical injection. A signal consisting of a carrier and two second order sidebands is used as a probe signal, which is generated by a Mach-Zehnder modulator (MZM) biased at the maximum transmission point. The amplification properties of the slave DFB laser under different injection powers are measured by measuring the power of the resonantly amplified probe signal after photodetector. Relationship between the optimum detuning frequency at largest gain of -2^{nd} order sideband and the gain of the carrier and the -2^{nd} order sideband in different injection ratios is also investigated. Optical single sideband (SSB) signal with high sideband suppression (SSR) is achieved, and a microwave signal with doubled frequency of the local oscillator (LO) signal with a good signal to noise ratio (SNR) is generated after photodetector. It provides a new way to generate a high frequency microwave signal.

Key words lasers; amplification; optical injection; microwave

OCIS codes 140.3490; 140.3515; 140.3520; 250.5960; 350.4010

收稿日期: 2012-12-28; 收到修改稿日期: 2013-01-31

基金项目: 国家 973 计划(2012CB315603)、国家自然科学基金(61177065, 61032005, 61174199)和江苏省自然科学基金(BK2012058)资助课题。

作者简介: 熊锦添(1986—),男,博士研究生,主要从事光载无线电和光纤光栅的设计制作等方面的研究。

E-mail: ydpanda@163.com

导师简介: 王 荣(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子学和光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

* 通信联系人。E-mail: nj_putao@163.com

1 引 言

近年来,光注入锁定半导体激光器是一个热点研究问题,国内外研究人员对此进行了深入广泛的研究。通过注入锁定可以极大地改善半导体激光器的各项性能^[1~3],如增强激光器稳定性、增强调制带宽、减小调制啁啾等。因而光注入锁定半导体激光器技术在超宽带信号产生、光生毫米波和光载无线电(RoF)系统中都有重要应用。例如,可以用来产生超宽带(UWB)信号^[4],实现全光波长转换^[5,6],产生高频微波信号^[7~9],也可以用来对基带数字信号进行光学上变频^[10,11],产生低相噪、高频谱纯度的电信号源^[12],产生单边带调制信号用以克服光纤链路中由色散引起的正弦衰落效应^[13,14]。这些应用都与光注入条件下的半导体激光器对注入信号的放大特性有关。但是,据了解,迄今为止还没有光注入条件下分布反馈式(DFB)半导体激光器的放大特性研究方面的报道。

本文对光注入条件下DFB半导体激光器的放大特性进行了研究,得到了不同注入功率比条件下DFB半导体激光器的放大特性曲线。同时研究了不同注入功率比条件下探测光信号的载波和-2级边带分别得到的增益放大程度以及-2级边带得到最大放大时的最佳失谐频率。利用载波和-2级边带在不同注入功率比条件下有不同增益的特性,得到了高边带抑制比(SSR, R_{SS})的单边带信号,这为用光学方式产生高频微波信号提供了一种新的方法。

2 原理及实验装置

2.1 原 理

实验发现,光注入条件下DFB半导体激光器对注入光信号具有放大特性。用马赫-曾德尔外调制

器(MZM)对主激光器发射的光波进行奇数阶边带抑制调制,得到一个只包含载波和正负二级边带、且载波边带功率比大于25 dB的探测信号。调谐载波波长,使得-2级边带在位于DFB半导体从激光器自由振荡频率附近从短波长往长波长方向移动,通过测量不同失谐频率条件下从激光器输出的光信号在相同功率值时经光电探测器检测所得的射频(RF)信号的功率,可以得到不同注入功率比条件下DFB半导体激光器的放大特性曲线。为了便于理解实验所得数据对实际物理现象变化的反映,定义失谐频率为注入的探测光信号中-2级边带与DFB半导体从激光器自由振荡频率之间的频率差。注入功率比 R 是指注入探测信号光功率与DFB半导体从激光器处于自由振荡状态时输出的光功率之比。

2.2 实验装置

实验系统结构如图1所示。分别选择可调谐激光器和DFB半导体激光器作为主、从激光器。MZM的偏置电压设为2 V,使之工作在最大传输点,射频驱动信号为10 GHz的正弦波。主激光器发射的连续光波经MZM进行奇数阶边带抑制调制后得到只包含载波和±2级边带、且载波边带功率比大于25 dB的探测信号。用一个掺铒光纤放大器(EDFA)和光可调衰减器(VOA)控制注入环形器1口的光功率。环形器2口输出信号通过一个50:50的耦合器分为两路,一路接光功率计,用于监测注入DFB半导体激光器的功率;另一路经偏振控制器(PC)调整偏振态后直接注入DFB半导体激光器。功率计显示的功率即注入DFB激光器的光功率。光注入后DFB半导体激光器的输出从环形器3口输出,通过另一个50:50的耦合器分为两路,一路接光功率计,用于观测输出信号的频谱;另一路经EDFA放大到固定功率值(本实验

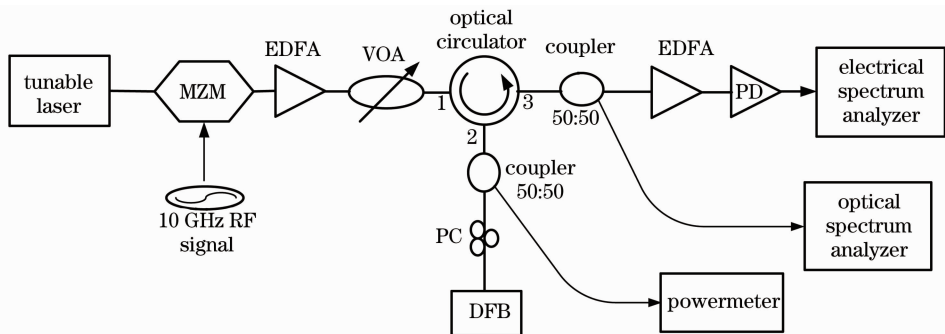


图1 光注入条件下分布反馈式半导体激光器放大特性研究的实验系统框图

Fig. 1 Experimental setup for studying the amplification properties of a distribution feedback laser under optical injection

为 5 dBm)后接一个 3 dB 带宽为 50 GHz 的高速光电探测器(PD, u²t XPDV2120R),然后用一个扫描带宽为 26.49 GHz 的电频谱仪(Agilent PXA N9030A)观察检测的射频信号。实验中光频谱仪的分辨率设为 0.05 nm。

3 实验结果与分析

3.1 不同注入功率比条件下DFB半导体激光器的放大特性

根据 2.1 节所述原理,测得不同注入功率比条件下DFB半导体激光器的放大特性曲线如图 2 所示。由图 2 可知,不同注入功率比条件下DFB半导体激光器的放大特性是不一样的。当注入功率比较小($R < 4$ dB)时,放大特性曲线有两个峰值,一个是在零失谐频率附近,表明-2 级边带在此处得到最大放大;另一个峰值是在-40 GHz 失谐频率处,表明+2 级边带在此处得到了最大放大,它们的大小值差不多。考虑测量误差,可以认为该放大特性曲线是关于失谐频率在-20 GHz 处对称的,即此时DFB激光器对探测光的±2 级边带有近乎相同的放大作用。随着注入功率比的增加,-40 GHz 失谐频率处的峰值不断减小,即DFB激光器对探测光的+2 级边带的放大作用越来越小。当注入功率比达到一定值($R > 9$ dB)后,-40 GHz 失谐频率处的峰值几乎消失,放大特性曲线成为一条类高斯型的单峰曲线,表明这个条件下DFB激光器只对探测光的-2 级边带有明显的放大作用。

值得注意的是,随着注入功率比的增加,对应接收射频信号功率的峰值 3 dB 带宽也随之增大。但峰值功率只在注入功率比为 9 dB 时达到最大值,说

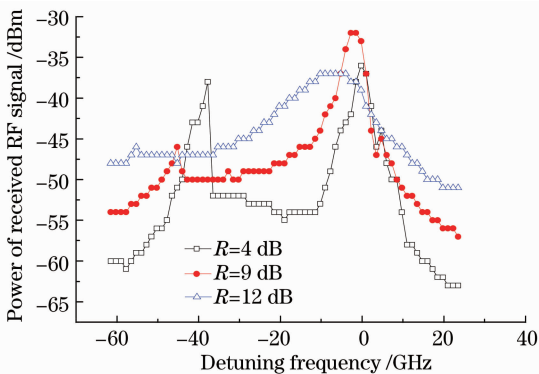


图 2 不同注入功率比条件下测得的接收射频信号功率与失谐频率的关系曲线

Fig. 2 Measured gain spectra of the received RF signal in different injection ratios

明此时经过DFB激光器的放大,探测光-2 级边带的功率已得到最大程度的放大,由实验结果可知此时-2 级边带的功率已与载波相同,因而拍频得到的接收射频信号功率最大。在其他注入功率比条件下,载波和-2 级边带的功率值均不相等,因而拍频得到的射频信号功率小于该最大值。这与光电探测器的平方律检测工作特性一致。

还应该注意的是不同注入功率比条件下,接收射频信号功率达到最大值,即-2 级边带得到最大放大的失谐频率是不一样的,这里定义这个频率为最佳失谐频率。最佳失谐频率与注入功率比的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知,随着注入功率比的增加最佳失谐频率呈逐渐减小的趋势,且他们的值在-4.4~ -6.2 GHz 范围内。这表明-2 级边带在偏离DFB激光器自由振荡波长的长波长方向处得到最大放大,且注入功率越大,偏离距离越大。这是因为DFB半导体激光器在光注入条件下腔内有源区载流子浓度因载流子被消耗而降低,折射率相应增大而使腔内纵模发生红移,注入光功率越大,红移越多。当-2 级边带位于红移后的腔模所在位置时即得到最大放大。

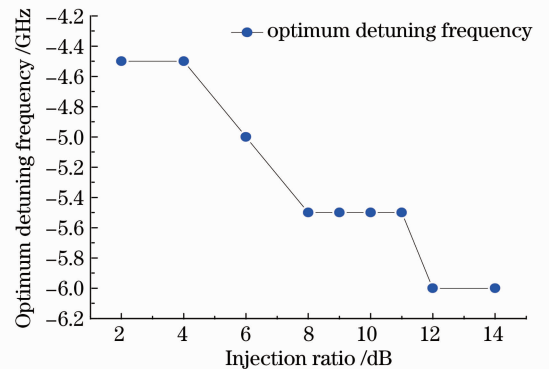


图 3 最佳失谐频率与注入功率比的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the optimum detuning frequency and injection ratio

3.2 基于光注入条件下DFB激光器的放大特性产生二倍频本地振荡信号的微波信号

实验中,通过比较经DFB激光器放大前后载波和-2 级边带的功率变化,考察了不同注入功率比条件下载波和-2 级边带分别得到的放大程度,增益曲线如图 4 所示。由图 4 可知,DFB激光器对探测光的-2 级边带的放大增益高达 23 dB 以上,而对载波的放大增益却不超过 5 dB,且他们都随注入功率比的增大而减小。因此,可以选择一个载波边带功率比大于 25 dB 的探测信号作为注入光,通过

控制注入光功率得到高 SSR 的单边带信号,从而可以产生高信噪比(SNR, R_{SN})的微波信号。

图 5 是实验得到的有高 SSR 的光单边带信号及其经过光电探测产生的微波信号。由图 5(a)可见,产生的光单边带信号有高达 23.6 dB 的 SSR,且载波和-2 级边带的功率相同,+2 级边带的功率在注入 DFB 激光器前后几乎不变。经光电探测器拍频检测所得的微波信号频率为 20 GHz,是本地振荡信号频率的 2 倍。在整个 26.49 GHz 的扫描带宽范围内没有其他明显的噪声,在 1 MHz 的扫描带宽范围内 SNR 为 50 dB,分别如图 5(b)和图 5(c)所示。

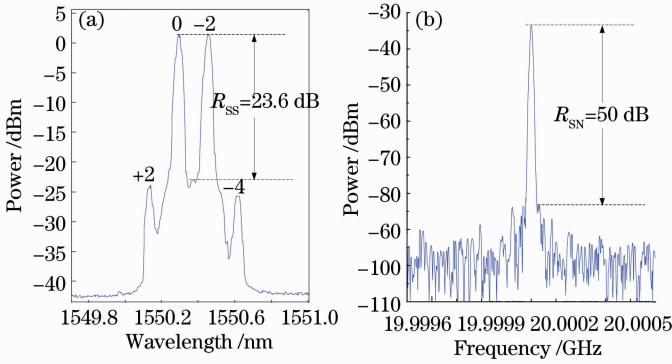


图 5 产生的高 SSR 光单边带信号及其拍频所得微波信号。(a)产生的单边带信号;(b)产生的微波信号(扫描带宽为 1 MHz);(c)产生的微波信号(扫描带宽为 26.49 GHz)

Fig. 5 Generated optical single sideband signal and the microwave signal. (a) Generated optical single sideband signal; (b) generated microwave signal with scanning bandwidth of 1 MHz; (c) generated microwave signal with scanning bandwidth of 26.49 GHz

4 结 论

本文对光注入条件下 DFB 半导体激光器的放大特性进行了研究,得到了不同注入功率比条件下 DFB 半导体激光器的放大特性曲线。同时研究了不同注入功率比条件下探测光信号的载波和-2 级边带分别得到的增益放大程度以及-2 级边带得到最大放大时的最佳失谐频率。基于光注入条件下 DFB 半导体激光器对探测光的载波和-2 级边带的不同放大特性,用 10 GHz 的本地振荡信号产生了频率间隔为 20 GHz 的高 SSR 的单边带信号,拍频产生了高 SNR 的 20 GHz 微波信号,无需滤波器实现了本地振荡信号的二倍频。由于实验室缺乏调制带宽大于 10 GHz 的外调制器以及扫描带宽大于 26 GHz 的电频谱仪,所以没有产生频率大于 20 GHz 的微波信

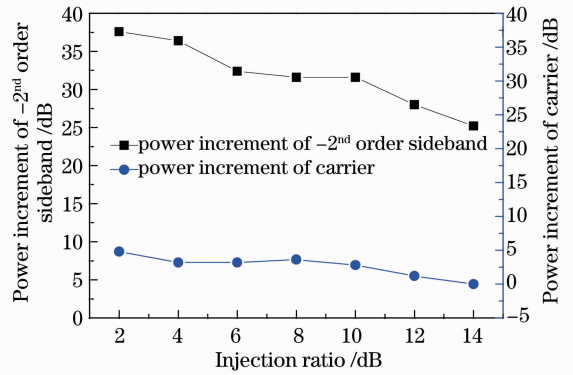
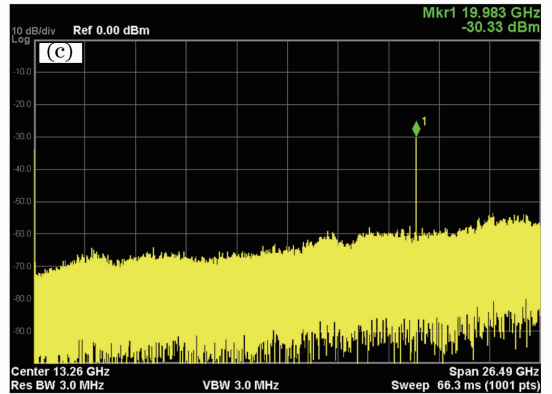


图 4 不同注入功率比条件下载波与-2 级边带分别得到的增益
Fig. 4 Gain of the carrier and the -2nd order sideband in different injection ratios



号,但是从理论上来说该方案具备产生更高频率的微波信号的潜力。这为用光学方式产生高频微波信号提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- 1 Roy Lang. Injection locking properties of a semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(6): 1215~1220
- 2 J. M. Liu, H. F. Chen, X. J. Meng *et al.*. Modulation bandwidth, noise, and stability of a semiconductor laser subject to strong injection locking [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10): 1325~1327
- 3 H. K. Sung, Erwin. K. Lau, Ming C. Wu. Optical properties and modulation characteristics of ultra-strong injection-locked distributed feedback lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1215~1220
- 4 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Liu Yi *et al.*. Ultrawideband signal generation based on injection locking of Fabry-Perot laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605006

郭精忠, 于晋龙, 刘毅等. 基于注入锁定法布里珀罗型激光二

- 极管的超宽带信号产生技术[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0605006
- 5 Jiang Huan, Wu Keying, Han Liuyan *et al.*. All-optical wavelength conversion technology using injection-locking in semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1183~1188
- 姜欢, 吴克琰, 韩柳燕等. 注入锁定半导体激光器全光波长转换技术[J]. 中国激光, 2005, **32**(9): 1183~1188
- 6 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Research on all-optical wavelength conversion based on FP-LD mode competition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1006004
- 郭精忠, 于晋龙, 王文睿等. 基于FP-LD中模式竞争机理的全光波长变换研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1006004
- 7 Cheng Hong, Mingjing Li, Cheng Zhang *et al.*. Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in sideband injection locking DFB [C]. ICMMT2008, 2008, **2**: 876~877
- 8 Wu Bo, Yu Jinlong, Liu Yi *et al.*. Generation of 40 GHz and 60 GHz millimeter wave signals by injecting low-frequency phase-modulated optical signal into a DFB-LD with the frequency-multiplication factor ranging from 4 to 16 [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105002
- 吴波, 于晋龙, 刘毅等. 基于低速光调相信号注入DFB-LD产生4~16倍频的40 GHz和60 GHz毫米波信号[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1105002
- 9 Han Bingchen, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Experimental study of continuously tunable photonic microwave frequency multiplication based on distributed feedback injection locking [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(12): 1205004
- 韩丙辰, 于晋龙, 王文睿等. 基于分布反馈注入锁定的连续可调光子微波倍频实验研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(12): 1205004
- 10 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Wu Bo *et al.*. Novel radio over fiber frequency up-conversion in millimeter wave band [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305005
- 王文睿, 于晋龙, 吴波等. 新型无本振毫米波光纤无线通信上变频系统[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0305005
- 11 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205003
- 郭精忠, 于晋龙, 王文睿等. 利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0205003
- 12 H. K. Sung, X. Zhao, E. K. Lau *et al.*. Optoelectronic oscillators using direct-modulated semiconductor lasers under strong optical injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **15**(3): 572~577
- 13 H. K. Sung, E. K. Lau, M. C. Wu. Optical single sideband modulation using strong optical injection-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 1005~1007
- 14 Cheng Hong, Cheng Zhang, Mingjing Li *et al.*. Single-sideband modulation based on an injection-locked DFB lasers in radio-over-fiber systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(7): 462~464

栏目编辑: 王晓球