

文章编号: 0253-2239(2008)07-1236-05

基于法布里-珀罗半导体激光器实现高重复频率 光脉冲的时钟分频

赵跃鹏 张明江 安 义 王云才

(太原理工大学理学院物理系, 山西 太原 030024)

摘要 实验研究了重复速率为 6.32 GHz 的光脉冲注入法布里-珀罗(Fabry-Pérot)半导体激光器实现 3.16 GHz 光脉冲输出的时钟分频现象,讨论了 Fabry-Pérot 半导体激光器的偏置电流、注入光功率、注入光光谱以及光谱线宽等因素对时钟分频的影响。利用光注入半导体激光器产生的周期二振荡非线性动力学特性,实现了高重复速率光脉冲的时钟分频。研究表明,当注入光的光谱较窄且锁定 Fabry-Pérot 半导体激光器某一纵模时,在较低的偏置电流和一定的注入光功率时,时钟分频才能发生。采用半导体激光器的速率方程,通过数值模拟,研究了半导体激光器的偏置电流和线宽增强因子以及注入光功率对时钟分频的影响,所得结果与实验结果相吻合。

关键词 光纤通信; 光时分复用; 半导体激光器; 光注入; 时钟分频

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082807.1236

Clock Division of High-Repetition Rate Optical Pulses from Fabry-Pérot Laser Diode

Zhao Yuepeng Zhang Mingjiang An Yi Wang Yuncai

(Physics Department, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract The high-repetition rate optical pulses clock division is investigated based on the nonlinear dynamics of optically injected Fabry-Pérot semiconductor laser. A train of 6.32 GHz injected optical pulses divided into 3.16 GHz is obtained. Effects of the bias current of laser diode, the injected optical power, and injected optical spectrum etc. on the clock division, has been analyzed. The high-repetition rate optical pulses clock division is realized with the periodically oscillated nonlinear dynamics in optically injected F-P laser diode. The clock division will occur when the injected pulse spectral width is narrow, a certain longitudinal mode of the F-P laser diode is locked, and the conditions of low bias current and appropriate injected optical power are met. In addition, the effect of the laser bias currents, linewidth enhancement factor, and injected optical power on clock division is numerically investigated. Numerical simulations are consistent well with the experimental results.

Key words optical fiber communication; optical time division multiplexing; laser diode; optical injection; clock division

1 引 言

全光时分复用系统中,在接收端对复用前单路时钟信号的提取是解复用的关键技术,引起了人们的广泛关注。目前提出的方案主要有以下几种:第一种利用太赫兹非对称光解复用器(TOAD)加反馈

环的技术^[1~3],能够从复用信号中提取到单路的时钟分频信号,但会受到半导体光放大器恢复时间以及光偏振敏感的影响^[4,5]。第二种是利用偏振无关全光半导体光放大器(SOA)/光栅的方法^[6,7],它对光的偏振敏感很小,但能够提取时钟信号的重复频

收稿日期: 2007-10-18; 收到修改稿日期: 2008-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(60577019)资助项目。

作者简介: 赵跃鹏(1977—),男,硕士研究生,主要从事全光通信系统方面的研究。E-mail: group-wang@tyut.edu.cn。

导师简介: 王云才(1965—),男,教授,硕士生导师,主要从事半导体激光器非线性动力学特性及其应用、激光技术及全光通信系统等方面的研究。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn(通信联系人)。

率有限。第三种是利用注入锁模光纤激光器进行时钟提取^[8~11],能够实现重复频率的二分频和四分频,但由于体积较大,对激光器器件的制造要求较高,目前很难投入实际使用。外光注入半导体激光器能够发生各种非线性效应,可以经历由倍周期分岔到混沌的非线性过程,已有大量的文献报道^[12~15]。其中利用倍周期现象实现外部注入光脉冲的时钟分频,由于其结构简单且对注入光脉冲重复频率的敏感性小,显示了较大的应用潜力,已引起一些关注^[16~18]。但这些报道仅仅限于时钟分频产生的实验方面,对实现时钟分频的一些重要因素几乎未进行研究,不利于对时钟分频进行有效控制,制约了它的进一步应用。本文通过理论和实验分别对外部光脉冲注入半导体激光器的时钟分频现象进行

了研究。其中重点对重复速率为 6.32 GHz 的光脉冲注入 Fabry-Pérot 半导体激光器实现 3.16 GHz 的时钟分频脉冲进行了研究,详细讨论了激光器偏置电流、注入光功率、注入光光谱以及线宽等因素对时钟分频的影响。

2 理论分析

当外光注入半导体激光器时,随注入光功率的变化,半导体激光器会呈现出不同的非线性效应,并且激光器的偏置电流和线宽增强因子均对时钟分频的产生有很大的影响,现采用半导体激光器的速率方程对其进行模拟,研究各因素对时钟分频的影响。在模拟中,选用一无量纲的耦合速率方程^[13]:

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_c \gamma_n}{\gamma_s \tilde{J}} \tilde{n} - \gamma_p (2a + a^2) \right] (1 + a) + \eta a_i \cos(\Omega t + \varphi), \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{b}{2} \left[\frac{\gamma_c \gamma_n}{\gamma_s \tilde{J}} \tilde{n} - \gamma_p (2a + a^2) \right] - \frac{\eta a_i \sin(\Omega t + \varphi)}{1 + a}, \quad (2)$$

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = -\gamma_s \tilde{n} - \gamma_n (1 + a)^2 \tilde{n} - \gamma_s \tilde{J} (2a + a^2) + (\gamma_s \gamma_p / \gamma_c) \tilde{J} (2a + a^2) (1 + a)^2, \quad (3)$$

式中 $a = (|A| - |A_0|) / |A_0|$, $|A|$ 为激光器振荡场的振幅, $|A_0|$ 为激光器自由运转时的振幅, $|A_i|$ 为注入光的振幅。 φ 为激光器振荡场 A 与注入场 A_i 之间的相位差。 $\tilde{n} = (N - N_0) / N_0$, 其中, N 为载流子密度, N_0 为激光器自由运转时载流子密度。注入强度参量满足 $\xi = \eta |A_i| / (\gamma_c |A_0|)$, 并且注入光功率正比于 ξ^2 。 b 为线宽增强因子。 $\gamma_c, \gamma_n, \gamma_p$ 和 γ_s 分别为光子衰减速率、受激辐射速率、增益饱和速率以及由于自发辐射引起的载流子衰减速率, Ω 为失谐频率。 $\tilde{J} = (J/ed - \gamma_s N_0) / (\gamma_s N_0)$, 其中, $J/(ed)$ 为注入载流子速率。速率方程中的参量均通过拟合实验测定的物理量来决定^[19]。所需测量的物理量为阈值电流, 输出光功率, 响应频率以及衰减因子。以下数值模拟所用半导体激光器的各个参量:

$$\gamma_c = 2.7 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}, \quad \gamma_s = 1.7 \times 10^9 \text{ s}^{-1},$$

$$\gamma_n = 2.2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}, \quad \gamma_p = 1.1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}.$$

取 $J = 0.2$ (即偏置电流 $I = 16.9 \text{ mA}$) 以及 $a_i = 0.07$ (即注入光功率 $P_{\text{out}} = -5.59 \text{ dBm}$), 通过模拟时间序列和功率谱来研究时钟分频产生的条件。模拟中, 光输出在注入光 1 ns 之后以便消除初始延迟

影响。图 1(a) 表示时钟分频信号的输出, 振幅交叉出现且相差较大。大振幅与小振幅的振荡周期都相等, 由于小振幅相对大振幅幅度很小, 表现为以大振幅输出, 即输出光脉冲为注入光脉冲重复频率的一半。

图 1(b) 表示相应的输出光的功率谱。模拟中, 当将偏置电流参量做幅度不大的变化时, 输出光脉冲的时间序列和功率谱几乎不变。而当注入参量 a_i 有很小的变化时, 时间序列的周期及振幅变化很大, 甚至混沌出现。图 1(c) 和图 1(d) 表示注入参量 $a_i = 0.08$ 时的时间序列和功率谱。从图中可以看到, 激光器输出光已经为混沌状态。可见偏置电流较小的变化几乎不影响到时钟分频的存在, 而当注入光功率有微小变化时, 时钟分频不再出现。

进一步, 通过数值模拟研究了激光器线宽增强因子对时钟分频的影响。结果发现, 线宽增强因子发生较小的变化, 能导致时间序列和功率谱发生很大的变化, 表明对时钟分频的影响很大。上面模拟中, 线宽增强因子取 $b = 4.2$, 模拟显示, 当 $3.76 < b < 4.36$ 时, 通过选取合适的注入参量, 时钟分频均能出现。

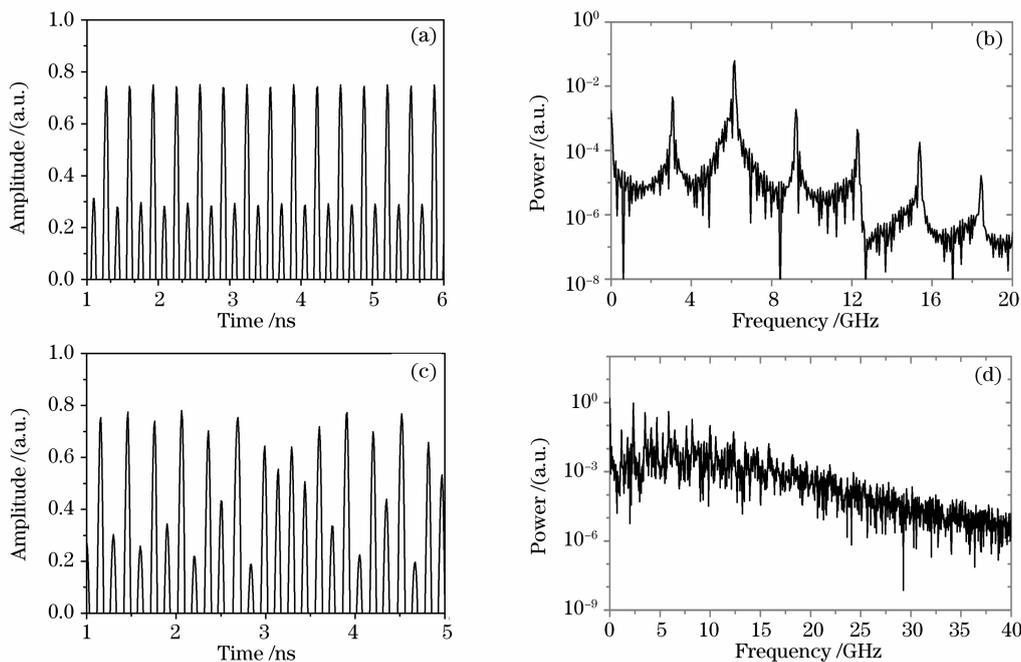


图 1 半导体激光器输出数值模拟结果。(a)时钟分频状态时间序列图,(b)时钟分频状态功率谱图,(c)混沌状态时间序列图,(d)混沌状态功率谱图

Fig. 1 Simulation results of laser diode output. (a) Time series of clock division, (b) power spectra of clock division, (c) time series of chaos, (d) power spectra of chaos

3 实验及结果分析

实验方案如图 2 所示。FP-LD 为中心波长 1550 nm, 阈值电流 13.2 mA 的半导体激光器。信号发生器(Agilent E8257D)产生的射频正弦信号直接调制 DFB-LD, 使其产生所需重复频率的光脉冲。由 DFB-LD 输出的光脉冲, 经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后, 通过环形器注入 FP-LD。可调谐衰减器用来调整注入光功率的大小, 偏振控制器(PC)用来控制注入光模式的耦合效率。输出光经另一掺铒光纤放大器放大后, 分别由取样示波器

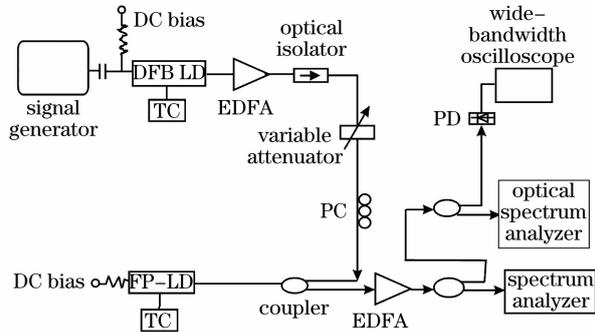


图 2 外光注入法布里-珀罗半导体激光器实现时钟分频的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the clock division in F-P laser diode with external optical injection

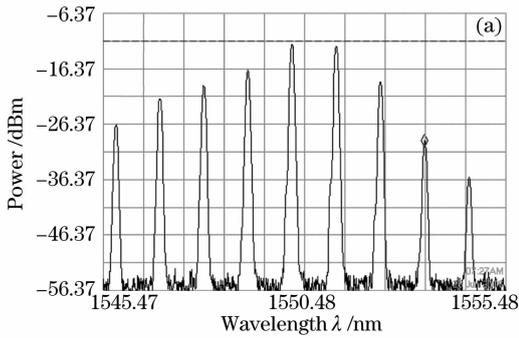
(Agilent 86100B)和频谱分析仪(Agilent E4407B)进行测量。实验中,为了研究实现时钟分频与注入锁定的关系,用光谱分析仪(Agilent 86140B)来观察输出光谱。

当 FP-LD 的偏置电流为 16.9 mA 且无光注入时,激光器呈现多纵模输出,如图 3(a)所示,其中心波长为 1550.16 nm。当注入光的波长为 1553.47 nm,与 FP-LD 中心波长右侧第三个波长相近,调整注入光功率的大小,使其达到锁定状态,输出光谱为 1553.47 nm 的脉冲,如图 3(b)所示。

然后逐渐调整注入光脉冲的重复频率,并对注入光功率进行微调,使注入的光脉冲对 Fabry-Pérot 激光器进行周期性的调制。当注入激光器光脉冲的重复速率为 6.32 GHz,功率为 -5.59 dBm 时,时钟分频得以实现,输出 3.16 GHz 分频时钟脉冲。图 4(a)表示注入 6.32 GHz 的光脉冲与输出 3.16 GHz 的分频时钟脉冲的波形。图 4(b)为相应输出脉冲的频谱。

首先,研究 FP-LD 的偏置电流对时钟分频的影响。实验发现,当偏置电流由 16.7 mA 增加到 17.6 mA 时,分频时钟脉冲可以通过适当调整注入光功率而一直存在,超过这个范围,分频时钟脉冲不再出现。当偏置电流设置到更高的值时,通过增大

注入光脉冲的重复频率以及调整注入光功率的大小,时钟分频信号仍然能够出现,但偏置电流的范围



明显减小。如果激光器的偏置电流超过 22.5 mA 时,时钟分频不再发生。

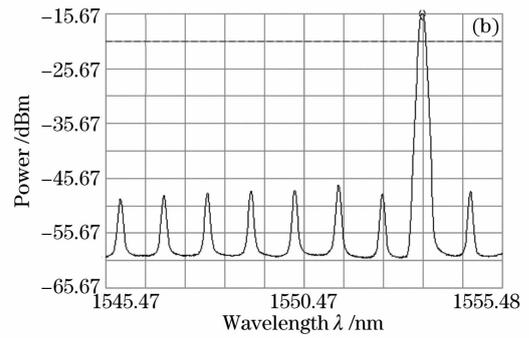


图 3 法布里-珀罗半导体激光器的光谱。(a) 无外光注入, (b) 外光注入

Fig. 3 Optical spectra of FP laser diode. (a) Without external optical injection, (b) with external optical injection

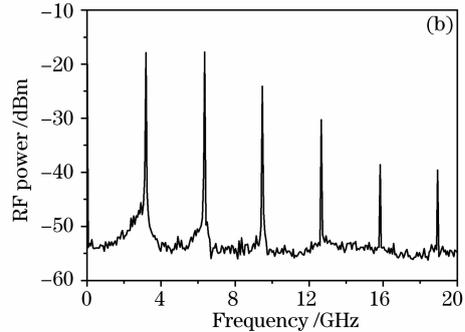
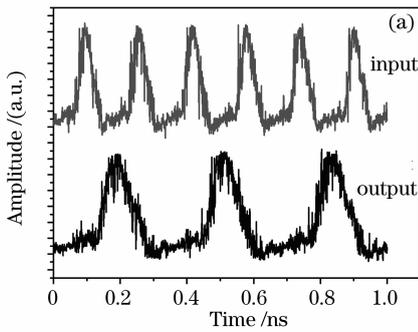


图 4 (a) 注入法布里-珀罗半导体激光器 6.32 GHz 的脉冲与输出 3.16 GHz 时钟脉冲波形, (b) 输出脉冲的频谱

Fig. 4 (a) Waveform of input 6.32 GHz signal and output 3.16 GHz clock signal, (b) power spectra of the output pulses

其次,注入光功率对时钟分频的影响也比较大。在分频信号出现后,对光功率进行微调,实验发现在 $-5.51 \sim -5.66$ dBm 时分频信号能够存在,超过该范围分频信号立即消失。当偏置电流较大且时钟分频发生时,能够保持时钟分频的注入光功率范围变小。

最后,研究光谱线宽和波长失谐对时钟分频的影响。实验发现,当线宽比较窄时时钟分频信号更易出现,而且脉冲抖动较小。注入锁定时,注入光波长与被选模式的波长失谐量在 4.0~8.0 GHz 最易发生时钟分频。

根据从激光器在外光注入时的输出功率谱变化情况可以推知:时钟分频的产生是由于外部光脉冲注入半导体激光器对其进行周期性的调制引起非线性效应而导致的结果。实验发现,在注入锁定时,当注入光导致从激光器发生倍周期振荡现象时,注入光脉冲的重复频率接近从激光器的振荡基频时,时钟分频才能发生。由于从激光器的振荡频率是随偏置电流和注入光功率的不同而变化的,所以通过调整这两个参量的大小,使振荡的基频频率向所需值附近移动。这样通过选择合适的偏置电流和调整注入光功率的大小,使振荡基频的频率与注入光脉冲

的重复频率相等时,时钟分频即可产生。

4 结 论

实验和理论分别研究了 6.32 GHz 的光脉冲注入 FP-LD 激光器输出 3.16 GHz 的时钟分频信号,讨论了偏置电流和注入光功率对时钟分频的影响。研究表明,当注入光的光谱较窄且锁定 Fabry-Pérot 半导体激光器某一纵模时,在较低的偏置电流和适当的注入光功率时,时钟分频才能发生。研究结果对全光时分复用系统中发展利用光注入半导体激光器实现单路时钟提取的方法有一定的指导作用。

致谢 感谢安捷伦科技有限公司为本实验测量无偿提供频谱分析仪。

参 考 文 献

- 1 A. E. Kelly, R. J. Manning, A. J. Poustie *et al.*. All-optical clock division at 10 and 20 GHz in a semiconductor optical amplifier based nonlinear loop mirror[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1337~1339
- 2 R. J. Manning, A. E. Kelly, K. J. Blow *et al.*. Semiconductor optical amplifier based nonlinear optical loop mirror with

- feedback; two modes of operation at high switching rate[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**: 45~51
- 3 Lina Yin, Guoming Liu, Jian Wu *et al.*. Clock recovery from NRZ data at 10 Gb/s using SOA loop mirror and mode-locked fiber ring laser based on SOA[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 72~75
- 4 Pang Huangang, Zhang Zhiyuan, Wu Shibao *et al.*. Influence of control pulse shape on switching characteristics of TOAD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 886~890
逢焕刚, 张志远, 伍仕宝 等. 控制脉冲形状对太赫兹光非对称解复用器开关特性的影响[J]. 光学学报, 2001, **21**(7): 886~890
- 5 Wen Liangsheng, Wu Jian, Lin Jintong. Analysis of the performance of TOAD due to frequency detuning of control and signal pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 656~661
温亮生, 伍 剑, 林金桐. 控制光和信号光频差对太赫兹光非对称解复用器性能的影响[J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 656~661
- 6 H. J. Lee, H. G. Kim. Polarization-independent all-optical clock division using a semiconductor optical amplifier/grating filter switch[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(4): 469~471
- 7 Zhang Feng, Chen Ming, Qin Xi *et al.*. All optical clock recovery from degraded non-return-to-zero data stream [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1101~1105
张 峰, 陈 明, 秦 曦 等. 恶化非归零码信号的全光时钟恢复 [J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1101~1105
- 8 T. Wang, C. Y. Lou, L. Huo *et al.*. All optical clock division and multiplication by injection mode-locked laser based on SOA [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, **35**: 463~469
- 9 K. G. Vlachos. Optical clock recovery and clock division at 20 Gb/s using a tunable semiconductor fiber ring laser[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**: 249~255
- 10 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
- 11 Ma Xiaohong, Yu Jinlong, Wang Lin *et al.*. Clock recovery of single channel in OTDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1541~1545
马晓红, 于晋龙, 王 林 等. 光时分复用系统中单路时钟的提取 [J]. 光学学报, 1999, **19**(11): 1541~1545
- 12 Ye Meiyong, Wang Xiaodong. Chaotic time series prediction using least squares support vector machines[J]. *Chin. Phys.*, 2004, **13**(4): 454~458
- 13 T. B. Simpson, J. M. Liu, K. F. Huang *et al.*. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers[J]. *Quant. Semiclass. Opt.*, 1997, **9**: 765~784
- 14 S. K. Hwang, J. M. Liu. Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**: 195~205
- 15 S. Wiczkorek, B. Krauskopf, D. Lenstra. A unifying view of bifurcations in a semiconductor laser subject to optical injection [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **172**: 279~295
- 16 Y. M. Yang, H. F. Liu, Y. Matsui. Scheme for all-optical clock division based on period doubling in semiconductor lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(22): 1852~1854
- 17 K. K. Chow, C. Shu, Y. M. Yang *et al.*. Optical control of period doubling in a gain-switched Fabry-Pérot laser diode and its application in all-optical clock division [C]. *IEE Proc-Optoelectron.*, 2003, **150**(3): 239~245
- 18 Zhao Yuepeng, Wang Yuncai, Zhang Mingjiang *et al.*. Period doubling in a Fabry-Pérot laser diode subject to optical pulse injection[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(7): 1949~1952
- 19 J. C. Cartledge, R. C. Srinivasan. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 852~860