

外光注入半导体激光器实现重复速率 可调全光时钟分频^{*}

牛生晓 张明江 安 义 贺虎成 李静霞 王云才[†]

(太原理工大学理学院物理系, 太原 030024)

(2008 年 3 月 19 日收到, 2008 年 5 月 14 日收到修改稿)

采用 Fabry-Perot 半导体激光器作为全光时钟分频器件, 利用光注入半导体激光器产生的非线性动力学特性, 实现了光脉冲的重复速率在 9.0 GHz 到 19.8 GHz 范围内连续可调的全光时钟分频. 同时利用半导体激光器速率方程, 对脉冲光注入半导体激光器产生时钟分频进行了数值模拟. 实验和模拟结果表明半导体激光器在光注入的驱动下处于一周期振荡状态, 当一周期振荡的二次谐波频率接近脉冲光的重复速率时, 其二次谐波和基频被脉冲光同时锁定, 此时将输出频率为脉冲光重复速率一半的时钟信号. 同时研究了波长失谐量和注入光功率对时钟分频的影响.

关键词: 周期振荡, 时钟分频, 光注入, 非线性动力学

PACC: 4262, 4255P, 4230Q

1. 引 言

光时分复用(OTDM)技术是提高光通信传输容量的优选方案之一, 在接收端进行全光解复用是该技术的一个难点, 而全光解复用的关键是支路时钟信号的提取, 即全光时钟分频. 目前可用于全光时钟分频的器件主要有半导体光放大器(SOA)^[1-3]、光纤激光器^[4]、半导体激光器^[5-7]等. 其中半导体激光器具有体积小、易于集成、成本低等优点, 成为全光时钟分频最有潜力的器件. 文献[5]和[6]中利用一个外加连续光控制的半导体激光器分别实现了 19.6 GHz, 12.4 GHz 全光时钟分频, 文献[7]利用半导体激光器的弛豫振荡现象实现了 10 GHz 全光时钟分频, 文献[8]利用微波锁定半导体激光器的周期二振荡实现了 18.56 GHz 的微波时钟分频, 并且提出可以利用周期二振荡实现全光时钟分频. 然而这些文献只报道了单个频率, 或者在一个较小的频率范围内实现了时钟分频. 我们已经利用外光注入半导体激光器从重复速率 6.32 GHz 的光脉冲中提取出 3.16 GHz 的光脉冲时钟分频^[9,10]. 本文中, 利用

一周期振荡的锁频现象实现了光脉冲重复速率从 9.0 GHz 到 19.8 GHz 连续范围内的全光时钟分频, 并且利用半导体激光器的速率方程进行了数值模拟.

2. 实验装置和结果

产生时钟分频的实验装置如图 1 所示. 光脉冲由集成电吸收调制器的分布反馈半导体激光器(EAM-DFB LD)产生, 其重复速率由信号发生器(Agilent E8257D)产生的射频信号来控制. 输出的光经掺铒光纤放大器(EDFA)后, 通过环形器注入法布里-珀罗半导体激光器(FP-LD), 偏振控制器(PC)用来控制注入光模式的耦合效率. 利用取样示波器(Agilent 86100B)和频谱分析仪(Agilent E4407B)对输出光进行测量. 用光谱分析仪(Agilent 86140B)来观察输出光谱.

当 DFB-LD 的偏置电流为 28.00 mA ($1.4I_{th}$), 工作温度约为 21°C 时, 激光器输出波长为 1550.26 nm, 如图 2(a)所示. 当 FP-LD 的偏置电流为 22.7 mA ($1.5I_{th}$), 工作温度约为 25°C, 且无外光注入时, 激

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60577019, 60777041)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

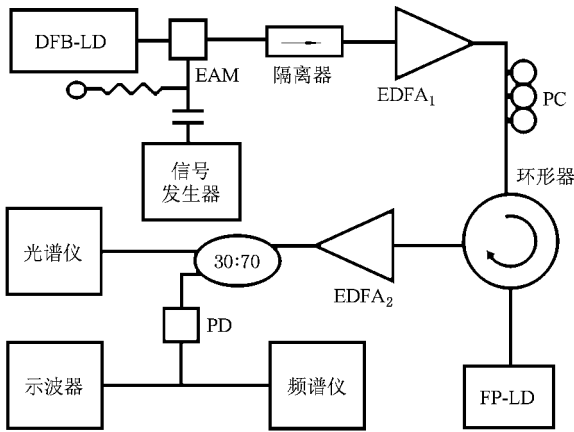


图1 外光注入FP半导体激光器实现时钟分频的实验装置 (EAM为电吸收调制器,EDFA为掺铒光纤环形器,PC为偏振控制器,PD光电探测器)

激光器呈现多纵模输出,中心波长为1550.23 nm,如图2(b)所示,主激光器与从激光器间的波长失谐量为0.03 nm。DFB-LD出射重复速率为12.0 GHz的脉冲光注入FP-LD,锁定其中心模式,输出光谱如图2(c)所示。

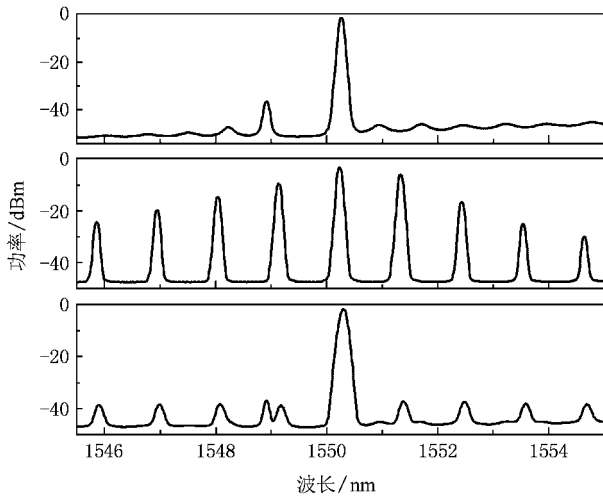


图2 光谱图 (a)DFB-LD的光谱 (b)无外光注入FP-LD的光谱 (c)注入锁定后FP-LD的光谱

调节注入光功率,当注入光功率达到-3.97 dBm时,时钟分频产生,此时分频信号基频的功率比二次谐波功率大20 dB,如图3所示。

当波长失谐量固定在0.03 nm的情况下,通过改变注入光功率可以得到从9.0 GHz到19.8 GHz重复速率范围内光脉冲的分频信号,并且可产生时钟分频的重复速率随着注入光功率的增大而增大。

3. 数值模拟

外光注入半导体激光器产生时钟分频的速率方程描述如下:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g(N(t) - N_0) \frac{S(t)}{1 + \epsilon S(t)}, \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{\beta \Gamma N(t)}{\tau_n} + \Gamma g(N(t) - N_0) \frac{S(t)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{S(t)}{\tau_p} + 2 \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{S(t - \tau_c) S_m(t)} \cos \xi(t), \quad (2)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{\Gamma g(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right] - \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S(t - \tau_c)}{S_m(t)}} \sin \xi(t), \quad (3)$$

$$\xi(t) = \phi(t) - \phi(t - \tau_c) + (\omega_2 - \omega_1)t. \quad (4)$$

式中 N 、 S 和 ϕ 分别为半导体激光器的载流子密度、光子密度和电场的相位; S_m 为主激光器的光子密

度, τ_c 为外部注入光的传输时间, $k_{inj} = (1 - R) \sqrt{\frac{r_p}{R}}$ 是衡量注入光强弱的一个参量,式中 R 为从激光器输出端面的光强反射率, r_p 为注入从激光器的光功率和主激光器发出的光功率之比, ω_1 和 ω_2 分别为主激光器和从激光器中心模式的角频率。各个符号的物理意义和参量见表1。

表1 各个符号的物理意义和参量

电子电量 $e/10^{-19}$ C	1.6
有源区体积 $V/10^{-16}$ m ³	1.5
载流子寿命 $\tau_n/10^{-9}$ s	2
光子寿命 $\tau_p/10^{-12}$ s	2
限制因子 Γ	0.4
阈值载流子密度 $N_{th}/10^{23}$ m ⁻³	4
透明载流子密度 $N_0/10^{23}$ m ⁻³	3
增益饱和系数 $\epsilon/10^{-23}$ m ³	3
线宽增强因子 α	4.5
微分增益系数 $g/10^{-12}$	2
自发辐射因子 $\beta/10^{-5}$	1
端面强度反射率 R	0.3
波长 λ/nm	1550

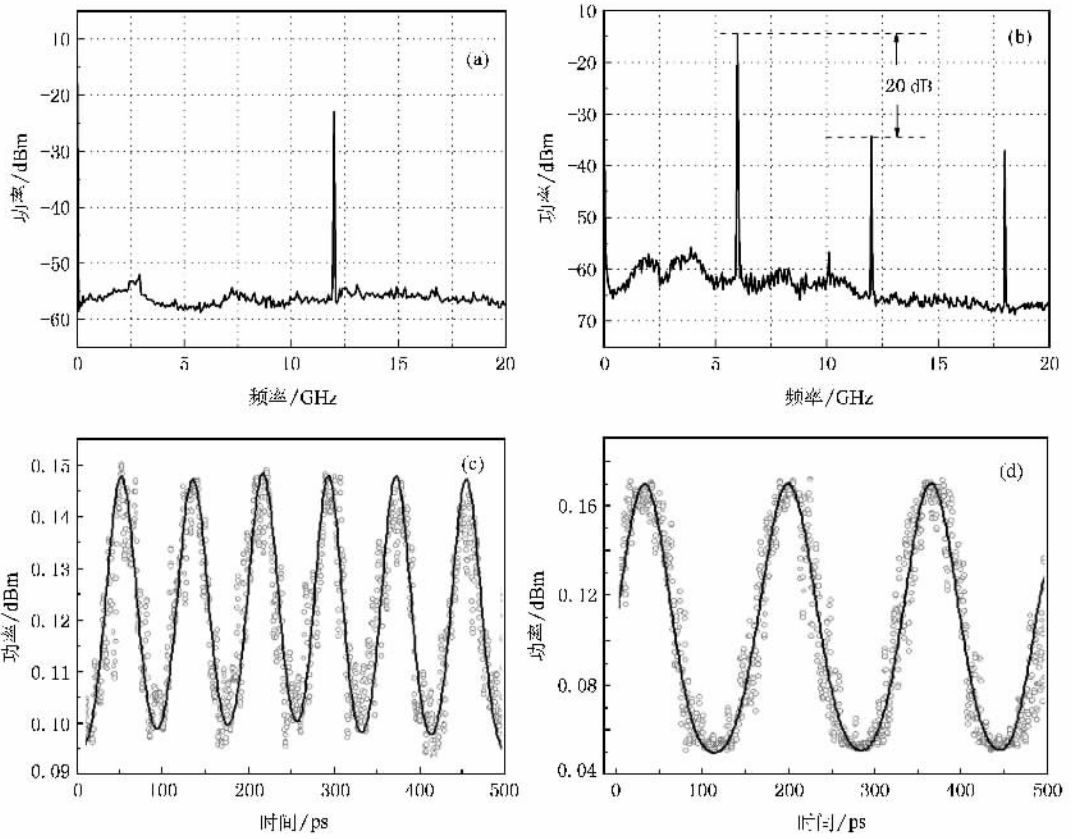


图3 频谱图和波形图 (a)注入12.0 GHz的频谱图 (b)输出6.0 GHz的频谱图 (c)注入12.0 GHz的波形图 (d)输出6.0 GHz的波形图

主激光器的波长与从激光器的中心波长失谐量 $\Delta\lambda = 0.024$ nm 时,且主激光器加载重复速率为 12.0 GHz 的调制, $K_{inj} = 0.130$ 时,输出 6.0 GHz 的分频信号,如图 4 所示. 波长失谐量和注入光功率不变的情况下,重复速率在 15.7 GHz 到 17.3 GHz 范围内,可以得到时钟分频信号.

在波长失谐量为 0.024 nm 不变的情况下, K_{inj} 在 0.114 到 0.229 范围内都可以得到重复速率在 11.4 GHz 到 15.4 GHz 范围内的光脉冲的时钟分频信号,并且可产生时钟分频的重复速率随着注入光功率的增大而增大,实验结果和模拟结果符合.

当注入信号光的重复速率增大时,通过增大波长失谐量和调节注入光功率可以得到该信号光的时钟分频. 信号光的重复速率增大 50 GHz 时,当波长失谐量增大到 0.192 nm,注入光强度 $K_{inj} = 0.700$ 时,得到频率为 25 GHz 的时钟信号,如图 5 所示.

4. 结果分析

波长失谐量 0.03 nm,注入光功率为 -3.97 dBm

的连续光时,产生一周期振荡现象,其振荡频率为 6.0 GHz,谐波频率为 12.0 GHz,但是基频和谐波频率线宽比较宽,如图 6 所示.

当脉冲光的重复速率接近一周期振荡的二次谐波,平均光功率为 -3.97 dBm 时,一周期振荡的二次谐波频率和基频频率被同时锁定,从而产生时钟分频现象. 波长失谐量 0.03 nm 不变的情况下,在一定范围内改变注入光功率,都可以产生一周期振荡,并且一周期振荡的频率随着注入光功率的增大而增大,如图 7 所示,与文献 [11][12] 和 [13] 的结果相似. 由于外光的注入使 FP-LD 的中心波长发生红移,并且随着注入光强的增大红移量也在增大,从而表现为一周期振荡的频率增大. 产生一周期振荡的情况下,当注入脉冲光的重复速率接近该振荡二次谐波的频率时,均可获得分频时钟信号.

模拟中,波长失谐为 0.024 nm, $K_{inj} = 0.130$ 的情况下,用连续光注入从激光器,产生一周期振荡,从频谱图上得知振荡基频频率为 6.0 GHz,谐波频率为 12.0 GHz. 时序图和相图也可以得出输出处于一周期振荡状态,如图 8 所示.

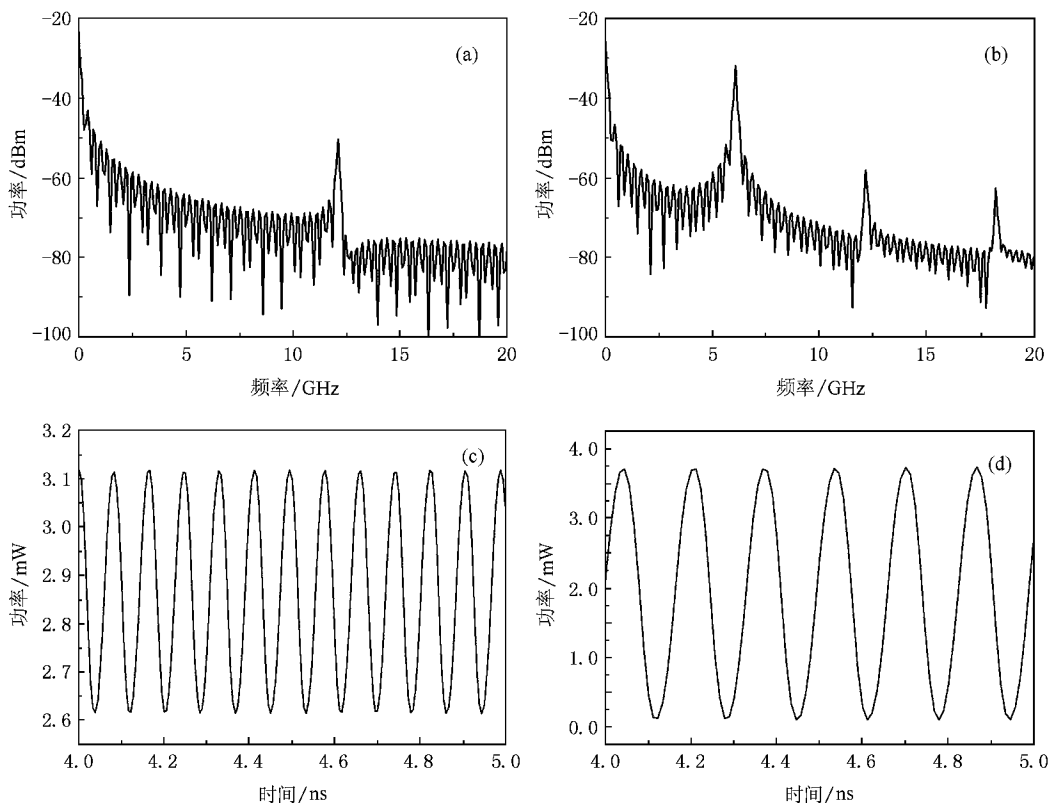


图 4 频谱图和时序图 (a)注入 12 GHz 正弦信号的频谱图 (b)输出 6 GHz 分频信号的频谱图 (c)注入 12 GHz 正弦信号时
时序图;(d)输出 6 GHz 分频信号的时序图

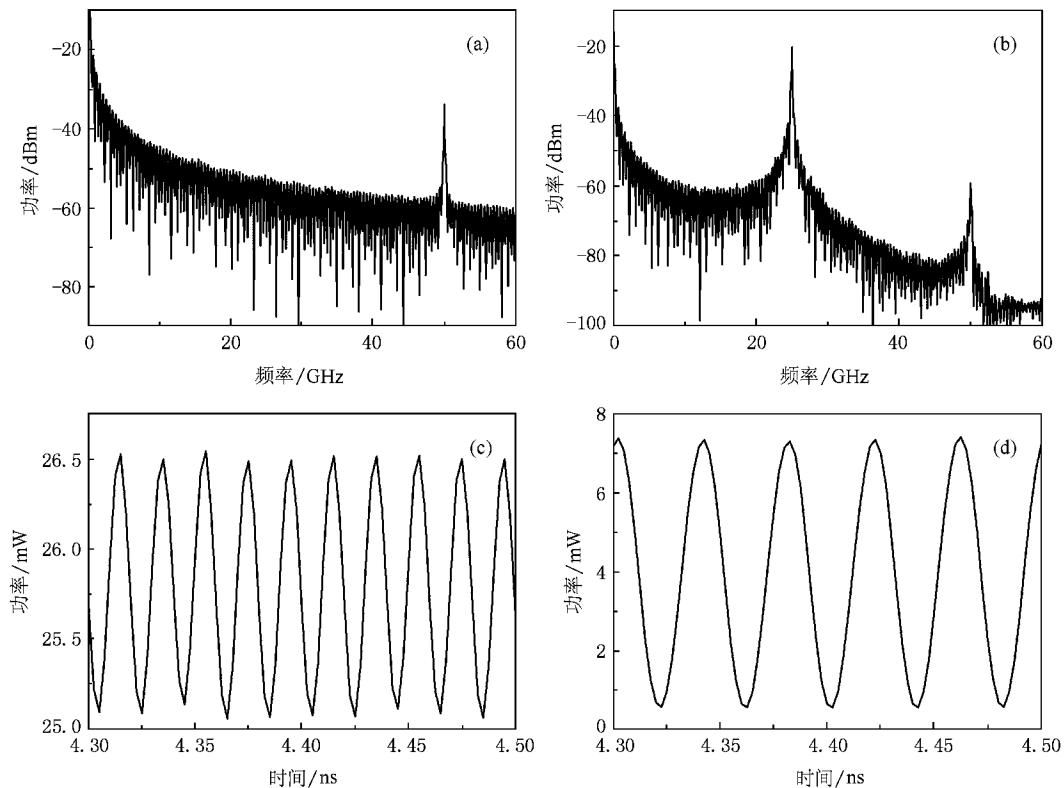


图 5 频谱图和时序图 (a)注入 50 GHz 正弦信号的频谱图 (b)输出 25 GHz 分频信号的频谱图;(c)注入 50 GHz 正弦信号
时序图;(d)输出 25 GHz 分频信号的时序图

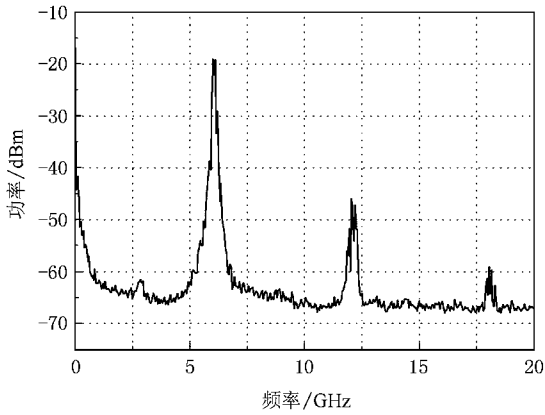


图6 连续光注入 FP-LD 产生的一周期振荡的频谱图

在波长失谐量为 0.024 nm 不变的情况下,注入光强度在 0.114 到 0.229 范围内都可以得到一定频率的一周期振荡,并且一周期振荡的基频频率随着注入光强度的增大而增大,如图 9 所示.在注入光强度不变的情况下对主激光器加载一周期振荡频率二倍左右的频率调制,均能够产生时钟分频现象,与实验结果符合.

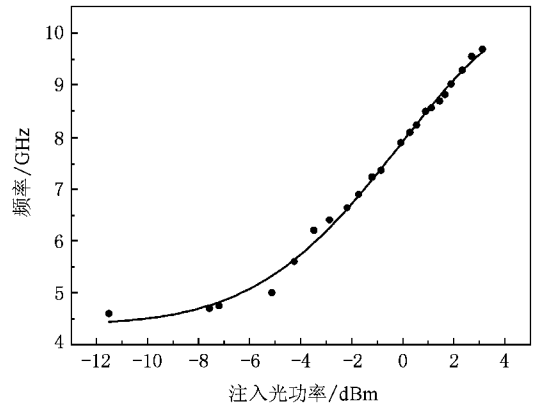


图7 波长失谐量为 0.03 nm 的情况下,一周期振荡频率随注入光功率的变化

改变波长失谐量,通过调节注入光功率可以在不同的频率范围内得到一周期振荡.如图 10 所示.当波长失谐量小于 -0.034 nm 时不能够得到任何频率的一周期振荡.通过调节注入光功率和波长失谐量在数值模拟中可以在 2.4 GHz 到 31.1 GHz 连续频率范围内得到一周期振荡.

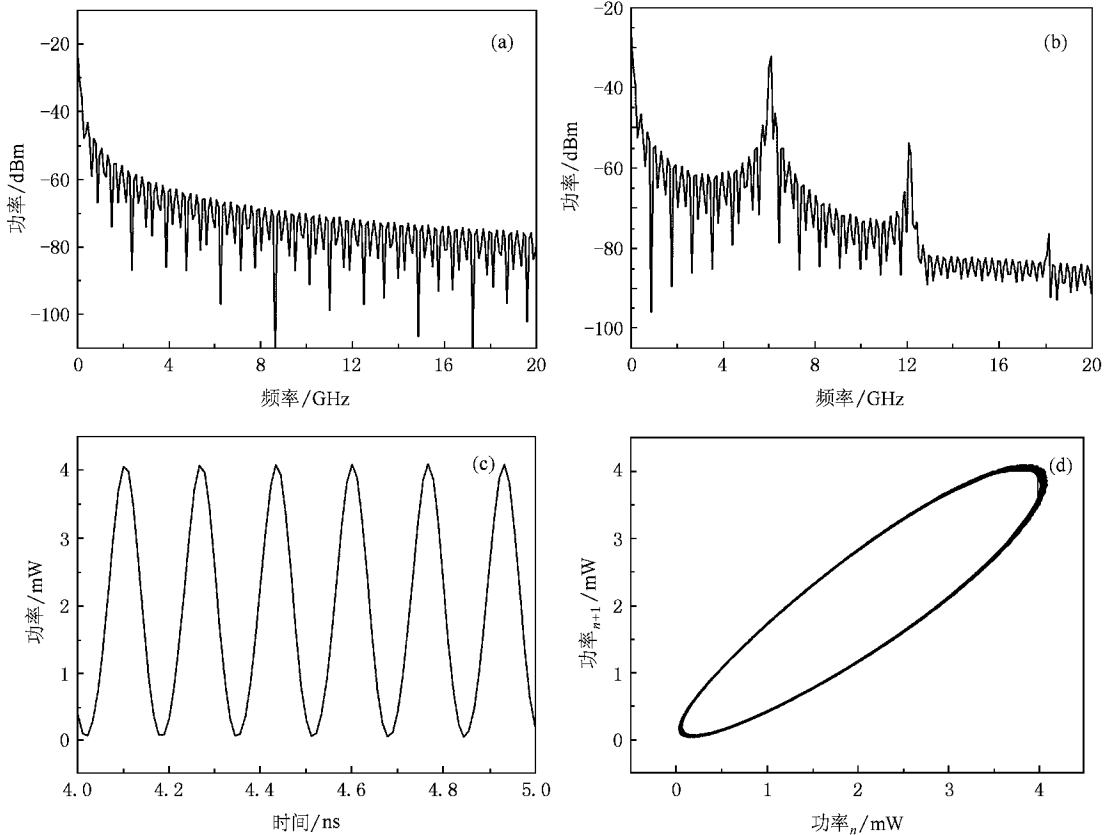


图8 频谱图、时序图和相图 (a)无光注入的频谱图 (b)输出一周期振荡的频谱图 (c)输出一周期振荡时序图 (d)一周期振荡的相位图

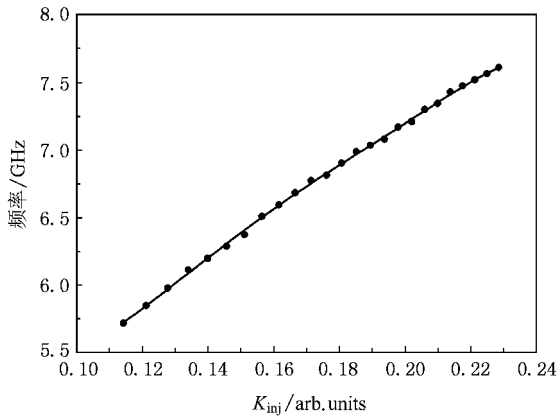


图9 波长为0.024 nm的情况下,一周期振荡频率随注入光强度的变化

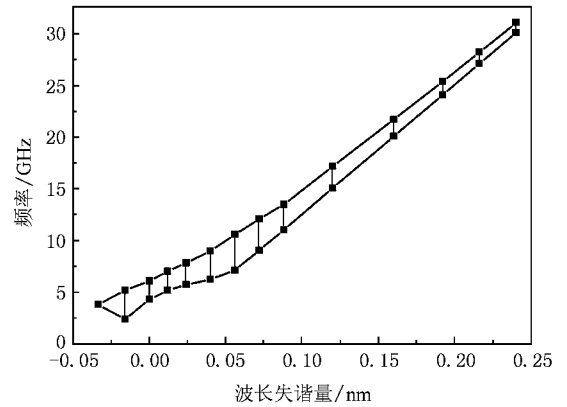


图10 一周期振荡基频频率范围随波长失谐量的变化

5. 结 论

实验研究了将重复速率为 12.0 GHz 的光脉冲注入 FP-LD 中提取出 6.0 GHz 的分频信号,在 1.5 GHz 的重复速率范围内都能够得到相位噪声低于 -90 dBc/Hz 的分频信号。通过改变注入光功率在重复速率为 9.0 GHz 到 19.8 GHz 范围内实现了全光时钟分频。利用一周期振荡锁频现象实现时钟分频现象,在一定波长失谐量和注入光功率的情况下,产生

一周期振荡现象,在一定的注入光功率范围内,随着注入光功率的增加产生一周期振荡频率增加。当一周期振荡的二次谐波频率接近脉冲光的重复速率时,一周期振荡的基频和二次谐波同时被锁定,可获得低相位噪声的分频信号。通过改变波长失谐量可以得到更高重复速率的时钟分频。利用半导体激光器的速率方程对光注入半导体激光器产生时钟分频进行数值模拟,模拟结果和实验结果符合。

感谢安捷伦科技有限公司为我们提供频谱仪。

- [1] Kelly A E, Manning R J, Poustie A J, Blow K J 1998 *Electron. Lett.* **34** 1337
- [2] Lee H K, Kim H G 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 469
- [3] Wang T, Lou C Y, Huo L, Wang Z X, Gao Y Z 2003 *Optics & Laser Technology* **35** 463
- [4] Vlachos K G 2003 *Opt. Commun.* **222** 249
- [5] Yang Y M, Liu H F, Mastui Y 2000 *Electron. Lett.* **36** 1852
- [6] Chow K K, Shu C, Yang Y M, Liu H F 2003 *Proc. IEE Optoelectron.* **150** 239
- [7] Chow K K, Shu C, Liu H F 2003 *Electron. Lett.* **39** 1136
- [8] Chan Z C, Liu J M 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1142
- [9] Zhao Y P, Wang Y C, Zhang M J, An Y, Wang J L 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1949
- [10] Wang Y C, Zhao Y P, Zhang M J, An Y, Wang J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6982 (in Chinese) [王云才、赵跃鹏、张明江、安义、王纪龙 2007 物理学报 **56** 6982]
- [11] Liu H F, Ngai W F 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 1668
- [12] Simpson T B, Liu J M, Huang S D et al 1997 *Quantum Semiclass. Opt.* **9** 765
- [13] Hwang S K, Liu J M, White J K 2004 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **10** 974

Frequency-tunable all-optical clock division using semiconductor laser subjected to external optical injection *

Niu Sheng-Xiao Zhang Ming-Jiang An Yi He Hu-Cheng Li Jing-Xia Wang Yun-Cai[†]

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

(Received 19 March 2008 ; revised manuscript received 14 May 2008)

Abstract

All-optical time division was obtained in the frequency range from 9.0 GHz to 19.8 GHz. Nonlinear dynamics of a Fabry-Perot laser diode subjected to external optical injection is applied for all-optical clock division. The research results indicate that semiconductor laser subjected to external light injection performs period-one oscillation. We obtain the clock division of the signal pulses when the second harmonic frequency of the period-one oscillation approaches the repetition rate of the signal pulse, and the second harmonic and the fundamental frequency of the period-one oscillation were locked by the signal pulses simultaneously. Numerical simulation was performed on the all-optical time division with signal pulse injection using the rate equation of the semiconductor laser. The simulation result is in good agreement with the experiment. Phase noise level of the divided clock is observed to be smaller than -90 dBc/Hz over a frequency detuning range of 1.5 GHz by changing the repetition rate of signal pulses under the fixed wavelength detuning value and input signal pulse power.

Keywords : period-one oscillating , clock division , optical injected , nonlinear dynamics

PACC : 4262 , 4255P , 4230Q

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60577019 , 60777041).

[†] Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn