

文章编号: 0253-2239(2005)10-1307-6

# 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取<sup>\*</sup>

吕捷<sup>1,2</sup> 于晋龙<sup>1,2</sup> 李亚男<sup>1,2</sup> 王宏丽<sup>1,2</sup> 杨恩泽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学电子信息学院光纤通信实验室, 天津 300072  
<sup>2</sup> 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 利用注入锁模光纤激光器进行时钟提取实验, 成功地从 40 Gb/s 伪随机码信号中提取出了 40 GHz 时钟信号。实验中, 在注入信号进入环形腔之前先通过一个马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪, 提高了注入信号中时钟频谱分量的相对大小, 从而有利于时钟信号的提取。首先从 10 Gb/s 伪随机码信号中提取出波形很好的 10 GHz 时钟信号, 并在此基础上从复用后的 40 Gb/s 伪随机码信号中提取出了 40 GHz 时钟信号。

**关键词:** 光纤通信技术; 时钟提取; 注入锁模; 码型效应; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号: TN913.7 文献标识码: A

## 40 Gb/s All-Optical Clock Extraction Based on the Injection Mode-Locked Laser

Lü Jie<sup>1,2</sup> Yu Jinlong<sup>1,2</sup> Li Yanan<sup>1,2</sup> Wang Hongli<sup>1,2</sup> Yang Enze<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Optical Fiber Communication, College of electronic information, Tianjin University, Tianjin 300072  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Clock extraction experiment based on the injection mode-locking laser is conducted. 40 GHz optical clock pulses are extracted from 40 Gb/s pseudo-random codes using injection mode-locked fiber laser. In the experiment, the injection signals pass through a Mach-Zehnder (M-Z) interferometer before going into ring cavity, so that the clock component of the injection signals increases relatively and it is beneficial to clock recovery. 10 GHz clock signal with perfect waveform from 10 Gb/s pseudo-random code, and then 40 GHz clock signal is extracted is firstly obtained from 40 Gb/s pseudo-random code after multiplexing.

**Key words:** optical fiber communication technology; clock extraction; injection mode-locking; pattern effect; Mach-Zehnder interferometer

### 1 引言

在高速光通信网中, 光纤的非线性效应、光放大器的放大自发辐射(ASE)噪声、群速度色散(GVD)、偏振模色散(PMD)等因素会使传输光信号的信噪比下降, 导致误码率增加, 全光 3R 再生是克服这些问题的有效解决方法。

全光时钟提取是全光 3R 再生的关键技术之一, 目前实现时钟提取主要有利用光电锁相环(PLL)技术<sup>[1,2]</sup>和基于锁模技术<sup>[3~10]</sup>这两类方法。前者是目前为止最为成熟的技术, 但缺点是系统过

于复杂、昂贵, 并且受“电子瓶颈”的限制。后者包括利用分布反馈(DFB)激光器<sup>[3,4]</sup>、被动锁模激光器<sup>[5]</sup>、锁模激光器<sup>[6~10]</sup>, 其中采用锁模激光器进行时钟提取的方案结构简单, 系统对偏振不敏感, 缺点在于腔长的不稳定和由于半导体光放大器(SOA)载流子恢复时间长而造成的码型效应<sup>[11]</sup>。

本文采用基于注入锁模激光器的时钟提取方案。伪随机信号先通过马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪再注入环形腔, 从而相对地增大时钟频谱分量的大小。腔内加入一段色散补偿光纤(DCF), 用以抵消

<sup>\*</sup> 国家 973 计划(2003CB31490)和国家 863 计划(2001AA31222)资助课题。

作者简介: 吕捷(1979~), 男, 天津人, 天津大学电子信息学院光纤通信实验室硕士研究生, 主要从事高速光纤通信系统的研究。E-mail: alhero@126.com

收稿日期: 2004-10-14; 收到修改稿日期: 2005-05-30

腔长变化的影响,从而抑制环形腔内超模噪声。

## 2 实验原理

基于注入锁模光纤激光器的时钟提取方案主要是利用半导体光放大器的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)特性,将比特信号直接注入半导体放大器中,调制光纤环形激光器腔内的损耗或相位,在腔长匹配的条件下,形成锁模,得到高重复速率、波长可调谐的时钟脉冲输出。

实验装置如图 1 所示。当波长为  $\lambda_0$  的 40 Gb/s

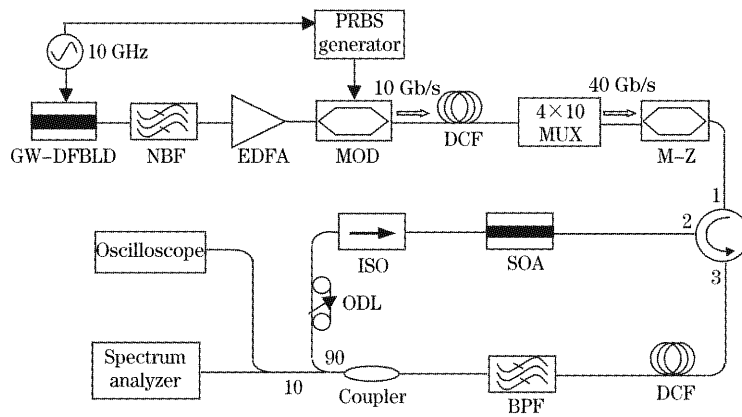


图 1 40 GHz 全光时钟提取实验装置

Fig. 1 Experimental setup for 40 GHz all-optical clock extraction

在实验装置中,环形腔内的关键器件是半导体光放大器。描述其增益的方程为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{g_0 L - h(t)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{E_{sat}} \{ \exp[h(t)] - 1 \}, \quad (1)$$

式中  $h(t)$  为半导体光放大器的积分增益,反映了半导体光放大器的增益特性,  $g_0$  为半导体光放大器的单位长度小信号增益,  $L$  为半导体光放大器的长度,  $\tau_c$  为载流子的恢复时间,  $P_{in}(t)$  为注入半导体光放大器的光功率,  $E_{sat}$  为半导体光放大器的饱和能量。

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \exp[h(t)], \quad (2)$$

$$\phi_{out}(t) = \phi_{in}(t) - ah(t)/2, \quad (3)$$

式中  $\phi_{in}$  为相应相位,  $a$  为线宽增强因子,  $P_{out}$  和  $\phi_{out}$  分别为经过半导体光放大器后的光功率和相位。由

伪随机码信号通过波分复用器(WDM)注入到半导体光放大器中时,消耗半导体光放大器的载流子,从而对半导体光放大器的增益产生周期性调制,并影响半导体光放大器的折射率,使得环内波长  $\lambda_1$  的光每次通过半导体光放大器时,振幅和相位都被调制。调节腔内光延时线的长度,使环形腔的基频为注入信号速率的整数分之一,便可形成谐波锁模,通过 10:90 的耦合器引出,得到重复频率为 40 GHz、波长为  $\lambda_1$  的光时钟信号。

(2) 式、(3) 式可以看到,半导体光放大器所起作用为交叉增益调制和交叉相位调制。

由于半导体光放大器载流子浓度的慢恢复特性,导致在高速率下的时钟提取存在码型效应,即恢复的时钟脉冲有着与注入数据码型有关的时间抖动和振幅起伏。实验中将两个分光比为 1:1 的  $2 \times 2$  光纤耦合器  $c_1$ 、 $c_2$  用两段不等长光纤  $L_1$ 、 $L_2$  熔接起来,构成自制的马赫-曾德尔干涉仪,如图 2 所示。用输出光强为  $I_2$  的一端作为输出,则干涉仪的传输函数  $T_2(\nu)$  如下<sup>[13]</sup>:

$$T_2(\nu) = \frac{I_2}{I_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi\nu n \Delta L}{C}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi\nu}{F}\right) \right], \quad (4)$$

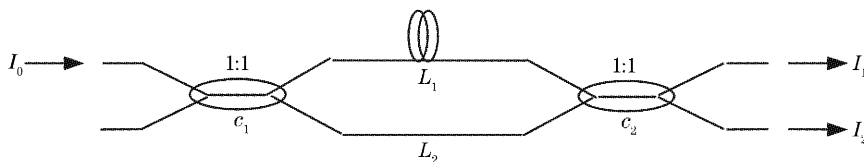


图 2 马赫-曾德尔干涉仪结构图

Fig. 2 The structure of Mach-Zehnder interferometer

式中  $\nu$  为光的频率;  $n$  为光纤纤芯的折射率;  $C$  为真空中的光速;  $\Delta L = L_1 - L_2$  为干涉仪两臂的长度差;  $F = C/(\nu\Delta L)$  为马赫-曾德尔干涉仪的自由程。在熔接时精确控制两臂的长度差, 分别制作了自由程为 10 GHz 和 40 GHz 的干涉仪各一个。

频域上, 由(4)式可以看到, 对于固定的自由程, 传输函数  $T_2(\nu)$  随输入光频率做周期性变化。当  $\nu$  与  $F$  满足关系式  $\nu = kF (k=1, 2, 3\cdots)$  时, 在不考虑损耗的理想情况下, 传输系数为 1; 而对于其他频率光信号, 传输系数均小于 1, 即经过干涉仪后有不同程度的衰减。因此, 当伪随机信号经过马赫-曾德尔干涉仪后, 信号中的时钟频率及其倍频成分被相对地放大了, 所以有利于时钟信号的提取。

时域上, 注入的伪随机码经过不等长的两臂会合在一起时, 出现三种叠加情况: 两个“1”码、“1”码和“0”码各一个、两个“0”码。图 3 所示是原始的 10 Gb/s 归零码光脉冲, 图中的横线代表“0”码, 脉冲代表“1”码。

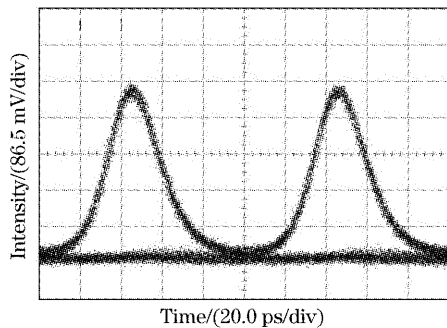


图 3 10 Gb/s 脉冲信号波形

Fig. 3 Temporal waveform of 10 Gb/s pulses

图 4 所示为经过马赫-曾德尔干涉仪后的光脉冲, 可以看到除了代表“0”码的横线外, 还有高度不等的两个脉冲, 其中较高的是两个“1”码叠加的结果。

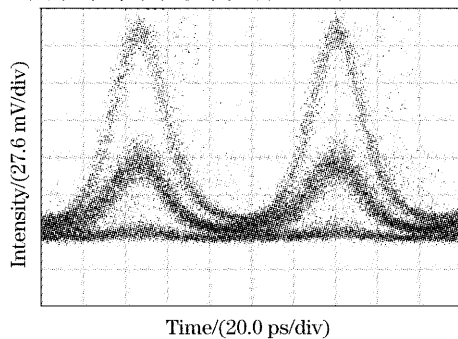


图 4 经过马赫-曾德尔干涉仪的 10 Gb/s 脉冲信号波形

Fig. 4 Temporal waveform of 10 Gb/s pulses after Mach-Zehnder interferometer

果。区别于原始伪随机信号的“0”、“1”码, 经过马赫-曾德尔干涉仪后出现了高低不等的三种状态, 有效地减小了连“0”码的长度, 或者说减小了“0”、“1”码之间的差别, 从而减小了码型效应。

### 3 实验方案

实验装置如图 1 所示。信号的产生及复用部分如图 1 上半部分所示: 由微波源产生 10 GHz (精确值为 9.9593 GHz) 的电信号驱动分布反馈激光器, 使其工作在增益开关状态, 输出波长为 1553 nm 的具有负啁啾的脉冲信号, 经过一带宽为 0.3 nm 的窄带光滤波器(NBF)滤除非线性啁啾, 再经掺铒光纤放大器(EDFA)后进入铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)调制器。由 10 GHz 微波源驱动的伪随机码发生器(PRBS)产生的 10 Gb/s 伪随机码 ( $2^{31} - 1$ ), 通过铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)调制器将信号调制为 10 Gb/s 归零(RZ)码光脉冲, 并利用一段正色散系数的色散补偿光纤(DCF)将光脉冲压窄<sup>[14]</sup>, 然后经复用器复用为 40 Gb/s 光脉冲。注入光脉冲先经过一个马赫-曾德尔干涉仪再注入环形腔。

注入信号由环形器的 1 端口经其 2 端口注入环形腔, 逆时针进入半导体光放大器, 产生交叉增益调制和交叉相位调制效应, 对环形腔内的增益和相位进行调制。腔内的隔离器保证环内时钟信号的单向顺时针传输, 可变光延时线用来精确调节腔长满足锁模条件。环路中的可调谐宽带滤波器用来选择锁模脉冲中心波长, 并滤除 1553 nm 处的注入信号。色散补偿光纤引入较大的正色散, 抑制锁模腔的噪声并提高锁模的稳定性。腔内的信号通过一个 10:90 的光耦合器的 10% 端口输出, 由示波器(HP 83480A)和光谱仪(Agilent 86142B)进行分析和记录。

### 4 结果与分析

首先进行了 10 Gb/s 的时钟提取实验。调节可变光延时线的长度来改变腔长, 使环形腔基频与注入频率相匹配, 形成锁模输出。当注入信号功率为 7.8 dBm, 半导体光放大器工作电流为 170 mA 时, 得到 10 GHz 时钟信号, 如图 5 所示。图中的时钟脉冲的线条较粗, 而且波峰和波谷粗细不均匀, 说明该脉冲的噪声较大。当注入信号通过自由程为 10 GHz 的马赫-曾德尔干涉仪后, 提取出的时钟信号如图 6 所示。比较图 5 与图 6, 可以看到加马赫-曾德尔干涉仪后, 时钟脉冲线条较细且较均匀, 说明

该脉冲的噪声较小,时钟信号质量得到了较大的提高。

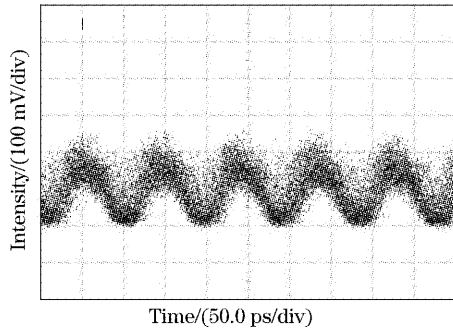


图 5 提取出的 10 GHz 时钟信号波形  
(未加马赫-曾德尔干涉仪)

Fig. 5 Temporal waveform of extracted 10 GHz clock signals (without Mach-Zehnder interferometer)

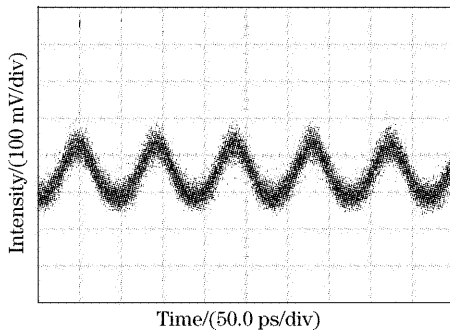


图 6 提取出的 10 GHz 时钟信号波形  
(加马赫-曾德尔干涉仪)

Fig. 6 Temporal waveform of extracted 10 GHz clock signals (with Mach-Zehnder interferometer)

在马赫-曾德尔干涉仪被证明有效的基础上,利用一个自由程为 40 GHz 的马赫-曾德尔干涉仪进行了 40 GHz 时钟提取实验。由调制器输出的 10 Gb/s 光脉冲经色散补偿光纤压窄后,进入复用器,复用后的 40 Gb/s 光脉冲示于图 7。重新调节光延时线,使腔长与注入信号频率相匹配,同时改变

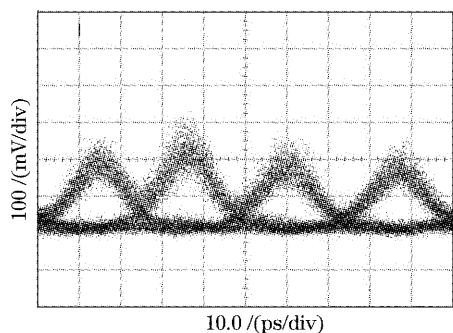


图 7 40 Gb/s 脉冲信号波形  
Fig. 7 Temporal waveform of 40 Gb/s pulses

注入信号功率和腔内增益大小以得到波形较好时钟信号。在注入信号功率为 10.3 dBm,半导体光放大器工作电流为 243 mA 时,得到 40 GHz 时钟信号,如图 8 所示。提取出的时钟信号的噪声很小,时间抖动也比较小。时钟信号波形很接近正弦波,而不是脉冲状,这是由于使用的示波器的频率响应速度有限,高频谐波分量没有得到反映,这一缺陷可以从其光谱上得以弥补。图 9 为 40 GHz 时钟信号的光谱图,从图中可以看到各谱线间隔 0.321 nm,换算为频率刚好是 40 GHz。各谱线间隔非常均匀,脉冲的谱形也很好。在中心谱峰两侧各有两个谱峰,分别反映了 40 GHz 和 80 GHz 分量。

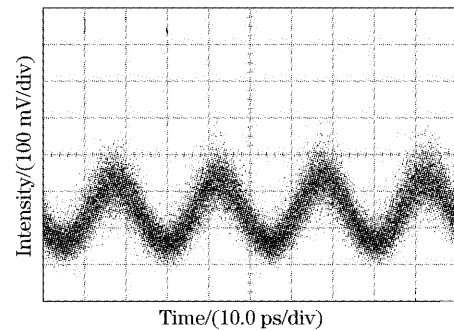


图 8 提取出的 40 GHz 时钟信号波形  
Fig. 8 Temporal waveform of extracted 40 GHz clock signals

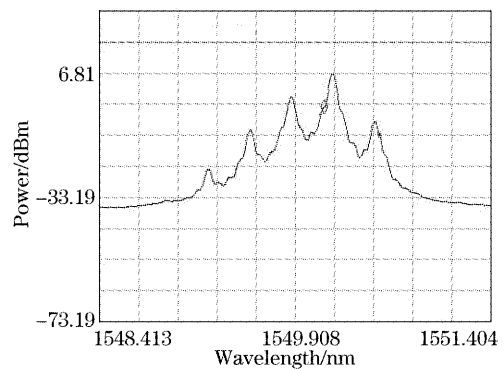


图 9 提取出的 40 GHz 时钟信号光谱

Fig. 9 Optical spectrum of extracted 40 GHz clock signal

实验中注意到注入信号的功率对提取出的时钟信号有较大的影响,注入功率存在一个最优值。通过实验得到了在半导体光放大器工作电流为 200 mA,注入光功率分别为 7.9 dBm、9.2 dBm、10.3 dBm、11.4 dBm 和 12.3 dBm 时提取出的时钟信号波形。从图 10 中可以看出:当注入光功率较小时,时钟信号幅度较小,消光比也较差;随着注入功率的增加,时钟幅度变大,消光比得到改善;然而,当注入功率进一步增加时,在消光比变大的同时,噪声

也增加了。对这种现象我们的分析是：当注入功率较小时，消耗半导体光放大器载流子较少，半导体光放大器的调制作用较弱，载流子恢复速度也较慢，因此这时输出的消光比较差；当注入增加时，消耗更多的载流子，半导体光放大器的调制作用逐渐增强，载流子恢复速度加快，所以消光比得到改善；当注入功

率进一步加强时，载流子被大大消耗，导致半导体光放大器无法提供足够的增益，因此噪声增大。半导体光放大器的工作电流决定了腔内增益的大小，一般情况下，较大的工作电流能得到比较好的时钟信号；而且当电流的大小和注入功率大小配合起来时，能取得更好的实验效果。

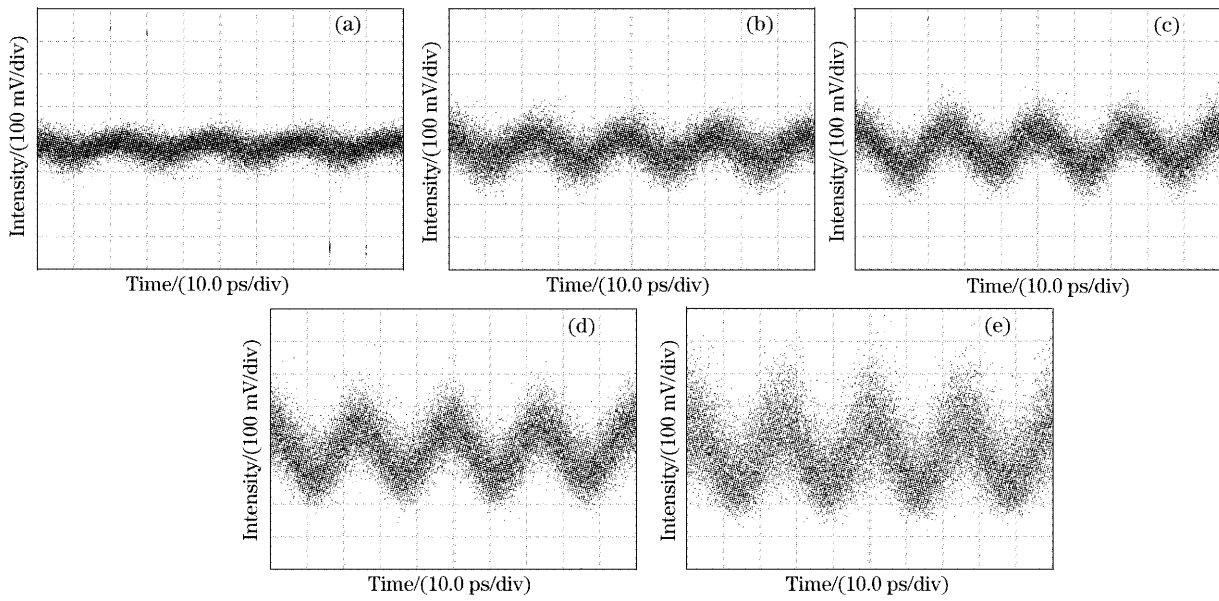


图 10 不同注入光功率下提取出的时钟信号波形图。(a) 7.9 dBm, (b) 9.2 dBm, (c) 10.3 dBm, (d) 11.4 dBm, (e) 12.3 dBm

Fig. 10 Temporal waveforms of extracted 40 GHz clock signals under the different input powers.

(a) 7.9 dBm, (b) 9.2 dBm, (c) 10.3 dBm, (d) 11.4 dBm, (e) 12.3 dBm

## 5 结 论

利用注入锁模技术进行全光时钟提取，在调节腔长和注入信号频率相匹配的情况下，调整注入信号功率达到最佳值，改变半导体光放大器工作电流与注入功率相配合，能提取出波形较好的时钟信号。实验中注入信号先通过马赫-曾德尔干涉仪再注入环形腔，从而减小了码型效应，在提取出波形很好的 10 GHz 时钟信号的基础上，进一步从复用后的 40 Gb/s 伪随机码信号中成功提取出 40 GHz 时钟信号。

## 参 考 文 献

- 1 Vehovc S, Vidmar M, Paoletti A. 80 Gb/s optical clock recovery with automatic lock acquisition using electrical phase-locked loop [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8): 673~674
- 2 Kamatani O, Kawanishi S. Ultrahigh-speed clock recovery with phase lock loop based on four-wave mixing in a traveling-wave laser diode amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(8): 1757~1767
- 3 Kim C, Kim I, Li X *et al.*. All-optical clock recovery of NRZ data at 40 Gb/s using Fabry-Perot filter and two-section gain-coupled DFB laser[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(20): 1456~1458
- 4 Bornholdt C, Sartorius B, Schelbase S *et al.*. Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gb/s [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 327~328
- 5 Attygalle M, Liu H F, Nirmalathas A. Robust all-optical harmonic clock signal generation through optical injection into passively mode-locked semiconductor lasers [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 1017~1019
- 6 Vlachos K, Theophilopoulos G, Hatziefremidis A *et al.*. 30 Gb/s all-optical clock recovery circuit [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 705~707
- 7 Hua Ying, Yu Jinlong, Ma Xiaohong *et al.*. Experimental investigation of all-optical subharmonic clock recovery in OTDM system based on the injection mode-locked fiber ring laser [J]. *High Technology Letters*, 2002, **12**(8): 13~16 (in Chinese)  
华 颖, 于晋龙, 马晓红 等. 基于注入锁模光纤激光器的 OTDM 时钟提取技术实验研究 [J]. *高技术通讯*, 2002, **12**(8): 13~16
- 8 Song Lijun, Li Shichen, Ge Chunfeng *et al.*. All-optical subharmonic and group clock extraction from unequal-amplitude-sequence multiplexed OTDM signals [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1010~1012 (in Chinese)  
宋立军, 李世忱, 葛春风 等. 脉幅有序变化 OTDM 信号的支路及群路全光时钟提取 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 1010~1012
- 9 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 10 GHz actively modelocked fiber ring laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 101~104 (in Chinese)  
彭 璨, 姚敏玉, 张洪明 等. 10 GHz 主动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 101~104

- 10 Hong Wei, Huang Dexiu. Clock component extraction of non-return-to-zero signal using semiconductor optical amplifier loop mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **24**(6): 781~786 (in Chinese)  
洪 伟,黄德修. 半导体光放大器环境的非线性归零信号时钟分量提取[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 781~786
- 11 Wang Tong, Lou Caiyun, Li Zhihong *et al.*. A novel technology to reduce the pattern effect in all-optical clock recovery using injection mode-locked laser based on SOA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 173~177 (in Chinese)  
王 桐,李智红,姜采云 等. 一种减少基于 SOA 的全光时钟提取码型效应的新方法[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 173~177
- 12 Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~2306
- 13 He Yujun, Yin Chengqun, Li Yongqian *et al.*. Application of fiber Mach-Zender interferometer in spontaneous Brillouin scattering measurement [J]. *J. North China Electric Power University*, 2002, **29**(4): 73~75 (in Chinese)  
何玉钧,尹成群,李永倩 等. 光纤马赫-曾德干涉仪在自发布里渊散射测量中的应用[J]. *华北电力大学学报*, 2002, **29**(4): 73~75
- 14 Ma Xiaohong, Yu Jinlong, Dai Jufeng *et al.*. Experimental research on three-stage compressing of 10 GHz gain-switch DFB laser output pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1478~1481 (in Chinese)  
马晓红,于晋龙,戴居丰 等. 10 GHz 增益开关激光器输出脉冲的三级压缩实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1478~1481