

# 速率可变差分相移键控非归零码信号的全光时钟提取

刘国栋<sup>1,2</sup> 吴重庆<sup>1,2</sup> 王甫<sup>1,2</sup> 孙振超<sup>1,2</sup> 毛雅亚<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学光信息科学与技术研究所, 北京 100044)  
(<sup>2</sup> 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 全光再放大、再定时、再整形(3R)技术是未来全光通信网络的发展方向,全光时钟提取是全光 3R 技术的关键技术之一。随着新型相位调制格式信号的广泛应用,对新型相位调制格式信号的全光时钟提取研究引起了越来越多的关注。基于此,提出了一种基于可调谐解调器的速率可变差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)信号的时钟提取方法。采用自由空间光的斐索干涉仪构成可调谐解调器,将 NRZ-DPSK 信号转换为含有时钟分量的归零码(RZ)强度信号,调谐范围可覆盖 2.5~40 Gb/s。将解调出的 RZ 信号注入到光纤环形激光器实现了 5 Gb/s 的长度为  $2^7 - 1$  的伪随机码 NRZ-DPSK 信号的全光时钟提取,其消光比高于 10 dB。

**关键词** 光纤光学; 差分相移键控非归零码; 时钟提取; 自由空间可调谐解调器; 光纤环形激光器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105010

## All-Optical Clock Recovery of Variable Bit-Rate Non-Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying Signal

Liu Guodong<sup>1,2</sup> Wu Chongqing<sup>1,2</sup> Wang Fu<sup>1,2</sup> Sun Zhenchao<sup>1,2</sup> Mao Yaya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Luminescence and Optical Information Technology, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** All-optical 3R (reampifying, retiming, reshaping) technique is the trend of the all-optical communication network and all-optical clock recovery is one of the key techniques of all-optical 3R technique. With the application of new phase modulation format, the research of all-optical clock recovery of new phase modulation format is attracting more and more attention. A new scheme of clock recovery of variable bit-rate non-return-to-zero differential phase shift keying (NRZ-DPSK) signal based on tunable demodulator is proposed. The tunable demodulator composed by Fizeau interferometer based on free space light converts the NRZ-DPSK signal into return-to-zero (RZ) signal which includes clock component. The demodulator can demodulate 2.5 Gb/s to 40 Gb/s NRZ-DSPK signal. The demodulated RZ signal is injected into the fiber loop laser and all-optical clock recovery from the length of  $2^7 - 1$  pseudo-random bit sequence (PRBS) NRZ-DPSK signal is realized. The extinction rate of the recovered clock is higher than 10 dB.

**Key words** fiber optics; non-return-to-zero differential phase shift keying; clock recovery; free space light tunable demodulator; fiber loop laser

**OCIS codes** 060.2340; 060.5060; 060.4510

## 1 引言

再放大、再定时、再整形(3R)再生技术是光纤通信系统的关键技术之一,其中全光 3R 技术是未来的发展方向。而全光时钟提取可以从恶化的数据

信号中提取出低抖动、高信噪比的时钟脉冲,实现再生信号的同步,是其关键技术之一。目前光纤通信系统的速率由之前的 10 Gb/s 跨越了 40 Gb/s,达到了 100 Gb/s,并向 400 Gb/s 以上的更高速率发

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61275075,11274037)、北京市自然科学基金(4132035)

作者简介: 刘国栋(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: 10118385@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信网络和光纤传感的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn(通信联系人)

展。在这种超高速率大容量的光通信系统中,普遍采用了具有更高非线性容忍度、稳健性以及更高光谱效率的新型调制格式信号<sup>[1-3]</sup>,如差分相移键控非归零码(NRZ-DPSK)、正交相移键控(QPSK)、正交振幅调制(QAM)等,其中差分相移键控(DPSK)编码信号是各种新型编码格式的基础<sup>[4-5]</sup>。因此,全光 3R 技术也必须适应这种变化,从 NRZ-DPSK 信号中提取光时钟信号就成为全光 3R 再生的关键技术之一。

近年来,单光纤单波长的速率已经突破 1 Tb/s,为合理利用如此巨大的信道容量,提出了一种新型网络结构——弹性光网络(EON),它将整体达到 100 Gb/s 以上速率的容量,分成很多粒度不同的管道,比如 2.5, 10, 40, 100 Gb/s 等,根据用户的需求进行动态配置。与之配套的 3R 技术,也要适应这种速率变动的需求,因此研制一种可以变速率可调谐的时钟提取技术,就成为未来弹性光网络的关键之一,具有重要的研究意义。

对非归零(NRZ)原始信号的频谱分析表明,它不含时钟分量,所以调制后的 NRZ-DPSK 信号也不包含时钟分量,因此不能直接从中提取出时钟信号。只有占空比小于 50% 的归零(RZ)强度信号,才包含时钟分量,因此需要将 NRZ-DPSK 信号转换为占空比小于 50% 的 RZ 码。利用延迟差分的方法,可将占空比为 100% 的 NRZ 码变为占空比为 50% 的 RZ 码。对于电信号,时钟分量可经由一个滤波器直接从 RZ 码滤出。

许多研究者已经对于 NRZ-DPSK 的时钟提取进行了研究,在锁模光纤激光器方面的基本方案近乎相

同,但在 NRZ-DPSK 到 RZ 码的码型转换方面方案有些差异。Wang 等<sup>[6]</sup>利用保偏光纤环形镜滤波器将 NRZ-DPSK 信号转换成 RZ 信号。Fu 等<sup>[7]</sup>利用线性啁啾光栅的色度色散效应实现码型转换。Contestabile 等<sup>[8-11]</sup>分别利用高斯型反射式光纤布拉格滤波器、光纤马赫-曾德尔(MZ)干涉仪、双模光纤中的两个模式间的干涉、光纤布拉格光栅(FBG)来实现码型转换。以上所述的各种时钟提取方法,都是针对固定的速率,不适用于各种不同等级比特率的变化,因此不能适应弹性光网络速率灵活配置的需求,同时也不能进行调谐,当信号的时钟发生漂移时,不能实现本地时钟对于信号时钟漂移的快速跟踪。为克服上述不足,本文提出并且验证了一种基于自由空间光斐索干涉仪的可调谐 NRZ-DPSK 信号解调器的全光时钟提取方案,该方案具有可变速率等级、调谐速度快、结构简单、性能稳定等特点。

## 2 时钟提取实验系统

实验系统由三部分组成,如图 1 所示,包括 NRZ-DPSK 信号发射源、可变速率时钟提取部分以及提取后的时钟信号测试部分。其中可变速率时钟提取部分是由 NRZ-DPSK 信号解调器和主动锁模光纤环形激光器组成,信号发射源由半导体激光器(LD)、调制器和可编程码型发生器(PPG)组成。中心波长为 1558.56 nm 的激光,被 PPG 输出的微波(RF)信号在调制器中调制为 5 Gb/s NRZ-DPSK 输出信号。在时钟提取部分,由 NRZ-DPSK 信号源产生的信号先进入基于自由空间光的可调谐解调器内,转换为 RZ 信号,然后注入到光纤环形激光器内

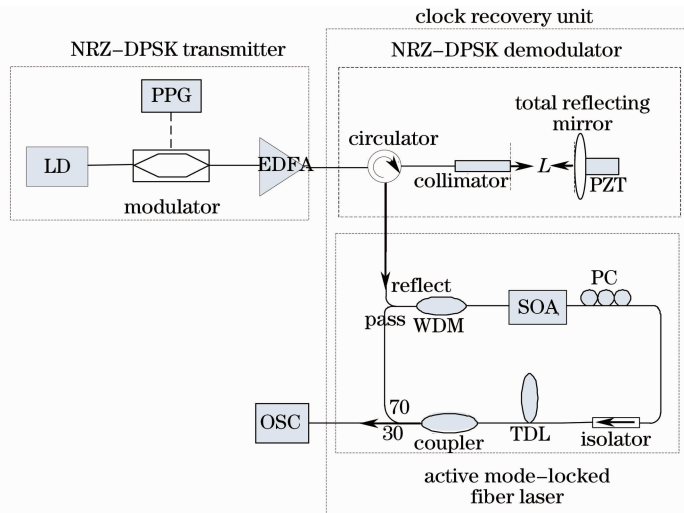


图 1 实验系统结构图

Fig. 1 Experimental setup

完成主动锁模实现时钟提取。时钟信号测试部分测试仪表为力科 LeCroy 100H 示波器。

可调谐解调器由环形器、准直透镜、全反射镜、压电陶瓷(PZT)、六维调节架以及电动平移台组成。NRZ-DPSK 信号从环形器 1 端口入射,从 2 端口出射进入准直透镜,部分光在准直透镜端面发生第一次端面反射;其余的透射光经全反射镜发生端面反射,再次进入准直透镜。两次反射光在准直透镜内干涉,形成斐索干涉仪,从而实现 NRZ-DPSK 相位信号到 RZ 强度信号的码型转变并从环形器 3 端口输出。

NRZ-DPSK 信号采用前后相邻的两个比特间的相位差来传输数字信号“1”和“0”,数学表达式为

$$s_{\text{in}}(t) = E_0 \exp\{i[\omega_0 t + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \pi f(t - nT), \quad (2)$$

(1)式和(2)式中,  $E_0$  为光场振幅,  $\omega_0$  为信号光中心频率,  $\varphi(t)$  为任意时刻相位,  $a_n$  为数字信号的信息部分,对于二进制数字信号  $a_n = 0$  或者 1,  $T$  为数字信号的时钟周期,  $f(t)$  为一个周期内数字信号的时域波形。若准直透镜和全反射镜之间的距离附加光程  $L$  满足  $L = cT/2$ ,其中  $c$  为空气中光速,  $T$  为不同速率的 NRZ-DPSK 信号比特周期,两次反射时延差  $\tau = T/2$ 。两次反射光相干后数学表达式如下:

$$s_{\text{dem}}(t) = E_0 \sqrt{r} \exp\{i[\omega_0 t + \varphi(t)]\} + E_0 s \exp\{i[\omega_0(t - \tau) + \varphi(t - \tau)]\}, \quad (3)$$

式中  $r$  为准直透镜的端面反射率,  $s$  为准直透镜的端面透射率,且  $r + s = 1$ 。

解调后信号光功率  $P(t) = |s_{\text{dem}}(t)|^2$ , 展开可得

$$P(t) = E_0^2 r + E_0^2 s^2 +$$

$$2E_0^2 \sqrt{rs} \cos\left\{\left[\varphi(t) - \varphi\left(t - \frac{T}{2}\right)\right]\right\}, \quad (4)$$

代入(1)式和(2)式以后不难发现,相位差  $[\varphi(t) - \varphi(t - T/2)]$  的前半周期是由同一比特相减得到的,因此永远是 0;后半周期是相邻比特的差值,如果两个比特的相位相同,则输出为 0,对应 RZ 码的高电平,若相异则输出为  $+\pi$  或者  $-\pi$ ,对应 RZ 码的低电平。为获得最好的干涉解调效果,提高消光比,准直透镜的端面需要镀反射膜,来增加端面反射光功率。实验中,准直透镜的端面反射率为 40%,透射率为 60%,镀膜后系统的插入损耗为 3 dB。

为实现不同等级速率 NRZ-DPSK 信号的时钟提取,附加光程  $L$  可以通过调节电动平移台实现大范围(0.375~6 cm)的改变,适应变速率(2.5~40 Gb/s)

的时钟提取,并可以通过 PZT 实现精确的微米级微调,实现本地时钟对于信号时钟漂移的快速跟踪。

光纤环形激光器是实现时钟提取的另一个关键部件,其研究已有很多报道<sup>[12-16]</sup>。本方案中的光纤环形激光器由波分复用器(WDM)、偏振控制器(PC)、半导体放大器(SOA)、隔离器、可调延时线(TDL)、滤波器及分光比 30:70 的耦合器组成。为减小环内损耗,环形激光器中采用 WDM 代替传统环形激光器中的 3 dB 耦合器和滤波器,以保证激光器大功率输出。经解调器得到的波长为  $\lambda_1$  的 RZ 信号经 WDM 注入到光纤环形激光器内,与 SOA 作用后经隔离器保证光信号沿顺时针单方向传输。调节 TDL 改变环形激光器的环长,改变其基频。调节 PC 可以改变注入 SOA 光的偏振态,进而调节环形激光器的激光偏振态。经过一定圈数的传输后,形成锁模,经 30:70 耦合器的 30 输出端输出,得到波长为  $\lambda_2$  的光时钟信号,实现时钟提取。

### 3 实验结果及分析

实验中,信号源部分的激光器输出连续光功率为 6 dBm,调制信号采用码型长度为  $2^7 - 1$  伪随机码(PRBS),经马赫-曾德尔调制器后输出光功率为 -1 dBm 的 NRZ-DPSK 信号,其光谱见图 2(a)。从光谱图可以看出在中心波长附近频率间隔为  $\pm 5$  GHz 处出现凹陷,这一现象是由信号调制所引起的,且中心波长距离凹陷处的频率间隔与调制速率数值相等。图 2(a)中 0.04 nm 对应频率间隔为 5 GHz,与调制速率的数值相等。由于调制得到的 NRZ-DPSK 信号本身质量不是很好,因此反映到光谱图,中心波长左侧凹陷不是很明显,但右侧凹陷非常明显。图 2(b)为 NRZ-DPSK 信号的眼图。为获得较好的实验效果,在调制器后用掺铒光纤放大器(EDFA)对 NRZ-DPSK 信号进行放大,输出峰值功率在 5 dBm~10 dBm 之间。

在时钟提取部分, NRZ-DPSK 信号首先经解调器,两次反射光延迟时间为 0.5 个比特周期,将 NRZ-DPSK 调相信号转换为 RZ 强度信号。5 Gb/s NRZ-DPSK 信号比特周期为 200 ps,空气中传播速度为  $3 \times 10^8$  m/s,延迟 0.5 个比特周期对应于空气中的距离为 3 cm。考虑两次反射对应延迟距离为 1.5 cm,即准直透镜和全反射镜之间的距离为 1.5 cm。RZ 信号的波形图、眼图及光谱图如图 3 所示。输出 RZ 信号的光功率为 1 dBm~5 dBm 之

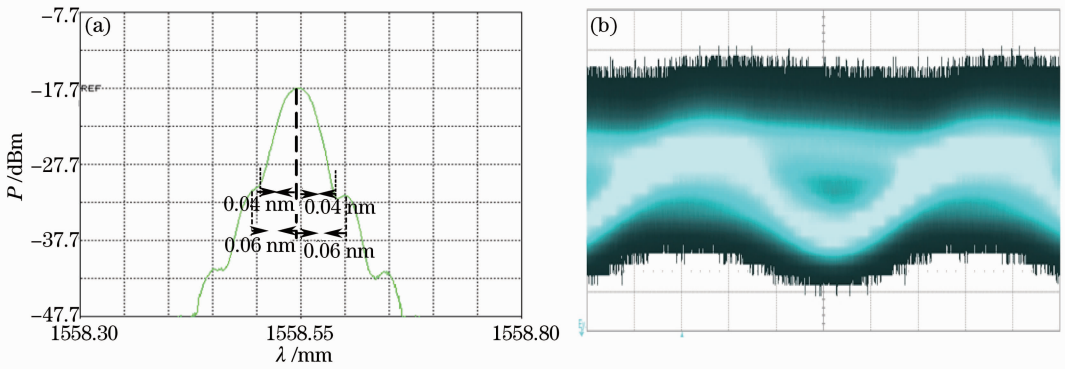


图 2 (a) 5 Gb/s NRZ-DPSK 信号光谱图; (b) DPSK 信号眼图  
Fig. 2 (a) Spectrum 5 Gb/s NRZ-DPSK signal; (b) waveform of DPSK signal

间。图 3(c)中相邻尖峰波长差为 0.04 nm, 对应频率间隔为 5 GHz。与图 2(a)中的中心波长频率间隔 5 GHz 处出现凹陷、相邻尖峰间隔 7.5 GHz 相

比, 解调后的信号中含有 5 GHz 的时钟分量, 可以用来实现时钟提取。

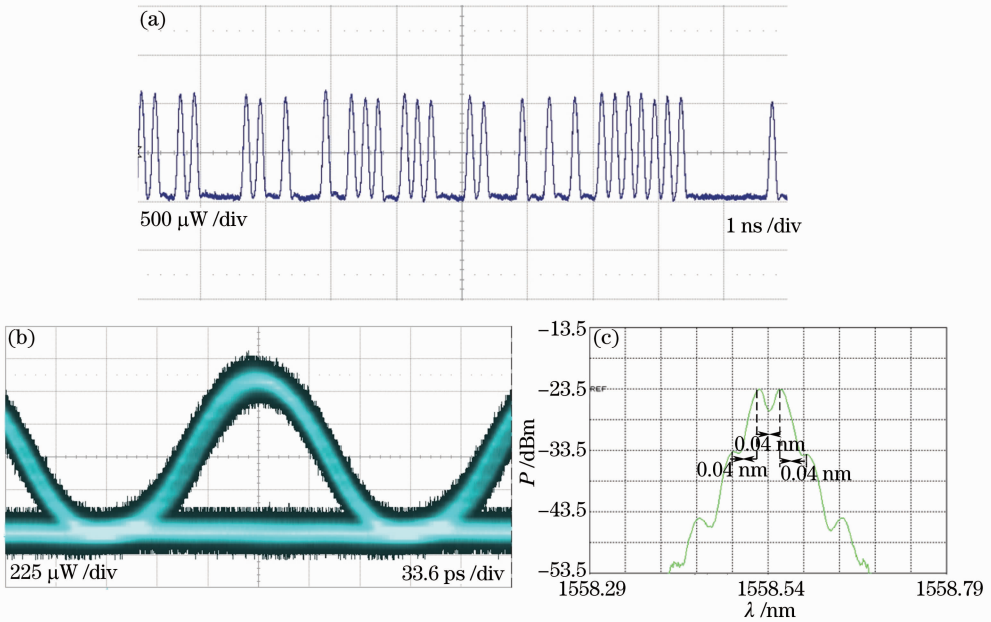


图 3 NRZ-DPSK 信号转换后的 RZ 信号(a)波形图、(b)眼图及(c)光谱图  
Fig. 3 (a) Waveform, (b) eye diagram and (c) spectrum of NRZ-DPSK signal converted into RZ signal

解调器输出的 RZ 信号注入到光纤环形激光器, 光纤激光器在 RZ 信号作用下受迫振荡, 输出周期性脉冲, 其频率与注入的 RZ 信号一致, 实现时钟输出。当 RZ 信号的光功率太小难以实现 RZ 信号与 SOA 的光-光作用时, 需要增加环形激光器中 SOA 的驱动电流, 约为 200 mA, 此时自发辐射功率为 100 μW。但 SOA 的驱动电流太大, 会导致较大的自发辐射, 使得时钟信号消光比下降。实验中的光纤激光器采用 WDM 作为滤波器, 其滤波范围较

宽(即 0.8 nm), 因此输出的时钟波形信号带有部分噪声, 降低了时钟信号的质量。实验时采用可调谐滤波器进行滤波, 该滤波器滤波范围很窄, 能够满足要求, 但是其滤波中心波长不稳定, 工作时间增加会使器件发热导致滤波中心波长发生漂移。为保证中心波长不会发生漂移, 采用 WDM 作为滤波器。图 4 为实验得到的时钟信号及眼图。由图中可以得到提取到的时钟信号周期为 200 ps, 通过测量, 得到的时钟信号消光比超过 10 dB。

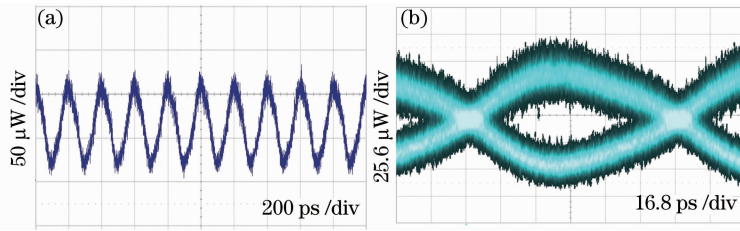


图 4 (a) 时钟信号波形；(b) 时钟信号眼图

Fig. 4 (a) Waveform and (b) eye diagram of clock signal

## 4 结 论

针对未来可变速率的弹性光网络中的时钟提取问题开展了研究,提出了一种速率可变 NRZ-DPSK 信号的时钟提取方法。该方法中码型转换部分为基于自由空间光斐索干涉仪的可调谐解调器,将 NRZ-DPSK 信号转换为含有时钟分量的 RZ 强度信号,调谐范围可覆盖 2.5~40 Gb/s。该方法中的主动锁模激光器部分为基于 SOA 的光纤环形激光器。将解调出的 RZ 信号注入到光纤环形激光器,合理地调节注入功率与 SOA 的驱动电流,实现了 5 Gb/s 的长度为  $2^7 - 1$  的伪随机码 NRZ-DPSK 信号的全光时钟提取,其消光比高于 10 dB。

## 参 考 文 献

- 1 P J Winzer, Renè Jean Essiambre. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4711-4728.
- 2 Rodney S Tucker. Green optical communications—part I: Energy limitations in transport[J]. J Sel Top Quantum, 2011, 17(2): 245-260.
- 3 A H Gnauck, P J Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(1): 115-130.
- 4 Shao Yufeng, Wen Shuangchun, Chen Lin, *et al.*. A staggered differential phase-shift keying modulation format for 100 Gbit/s applications[J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12937-12942.
- 5 Xu Chris, Liu Xiang, Wei Xing. Differential phase-shift keying for high spectral efficiency optical transmissions[J]. J Sel Top Quantum, 2004, 10(2): 281-293.
- 6 Wang Fei, Yu Yu, Huang Xi, *et al.*. All-optical clock recovery of 20 Gbit/s NRZ-DPSK signals using polarization-maintaining fiber loop mirror filter and semiconductor optical amplifier fiber ring laser[J]. Opt Commun, 2009, 282(12): 2292-2296.
- 7 Fu Songnian, Zhong Wende, Tang Ming, *et al.*. All-optical NRZ-DPSK clock recovery using linearly chirped fiber Bragg grating induced clock tone[J]. Optical Fiber Technology, 2008,

- 14(3): 222-226.
- 8 Giampiero Contestabile, Marco Presi, Nicola Calabretta, *et al.*. All-optical clock recovery for NRZ-DPSK signals [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(23): 2544-2546.
- 9 Yu Yu, Zhang Xinliang, Wang Fei, *et al.*. Single AWG based clock extraction from WDM NRZ-DPSK signals with mixed bit-rates[C]. Conference on Laser and Electro-Optics, 2010. 1-2.
- 10 SieWook Jeon, TaeYoung Kim, WonBae Kwon, *et al.*. All-optical clock extraction from 10-Gbit/s NRZ-DPSK data using modal interference in a two-mode fiber[J]. Opt Commun, 2010, 283(4): 522-527.
- 11 M Presi, N Calabretta, G Contestabile, *et al.*. Simultaneous data demodulation and all-optical clock extraction from pure DPSK packets[C]. Annual meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2006. 853-854.
- 12 Wu Chongqing. Analysis on SOA based fiber ring laser [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(6): 1-4. 吴重庆. 基于 SOA 环形腔激光器的理论分析[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(6): 1-4.
- 13 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Fang Zujie, *et al.*. Study on a fiber ring laser with unidirectional operation without isolator[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 922-924. 孙国勇, 瞿荣辉, 方祖捷, 等. 无需隔离器的单向运行光纤环形激光器的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 922-924.
- 14 Yaqian Ding, Yunfeng Qi, Yuan Liu, *et al.*. Dual-wavelength fiber grating laser in linear overlapping cavity[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(12): 120603.
- 15 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming, *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 101-105. 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): 101-105.
- 16 Wen Ji, Shufen Chen, Lei Fu, *et al.*. Experimental study of an ultra narrow linewidth fiber laser by injection locking[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(8): 080601.
- 17 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Yanan, *et al.*. 40 Gb/s all-optical clock extraction based on the injection mode-locked laser [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10): 1307-1312. 吕 捷, 于晋龙, 李亚男, 等. 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1307-1312.

栏目编辑:王晓琪