

基于锁模脉冲源和高速光开关的时分抽样模数转换

窦玉杰 张洪明 傅鑫 姚敏玉

(清华大学电子工程系清华大学信息科学与技术国家实验室, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 提出了一种基于锁模脉冲源和高速光开关的时分抽样模数(A/D)转换系统。使用高重复频率、窄脉宽的锁模脉冲串对射频信号进行抽样, 利用高速光开关进行时分复用, 将高采样率的信号转换为并行的多路低采样率信号, 以适应现有的电模数转换器进行量化和编码, 并且通过改变光开关的频率, 可以灵活地改变解复用后每路信号的频率。系统的优点在于可扩展性高, 只需一个锁模脉冲源。使用 10 GHz 重复频率的锁模脉冲和 1.25 GHz 的高速光开关验证了系统方案的可行性。利用实验中得到的采样点可以较好地恢复出时域信号, 并且得到了各个频率的频谱图。其信噪比可达 32.02 dB, 等效于 5.03 bit 的有效比特数。

关键词 信号处理; 光模数转换; 时分抽样; 锁模脉冲; 时分复用

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105006

Optical Analog-to-Digital Conversion by Time-Interweaved Sampling Based on Mode-Locked-Pulse and High-Speed Optical Switch

Dou Yujie Zhang Hongming Fu Xin Yao Minyu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A time-interweaved sampling scheme for analog-to-digital (A/D) conversion based on mode-locked-pulse and high-speed optical switch is proposed. The radio frequency (RF) signal is sampled by high repetition rate ultra-short mode-locked pulse, and then demuxed by high-speed optical switch, which can convert the high frequency sampled signal to multi-channel lower frequency signal. So we can use electronic A/D conversion to quantize and code. The frequency of signal demuxed by optical switch can change easily if the frequency of the optical switch is changed. This scheme is very flexible, and only one mode-locked-laser is required. The scheme is demonstrated using a mode-locked-pulse with repetition frequency of 10 GHz and a 1.25 GHz high-speed switch. Using the experimental data, a better in-time signal is recovered and the spectra is obtained. The signal-to-noise of this scheme is 32.02 dB, equivalent to effective number of bits of 5.03 bit.

Key words signal processing; optical analog-to-digital conversion; time-interweaved sampling; mode-locked pulse; optical time division multiplexing

OCIS codes 060.1810; 060.4510

1 引言

在过去的几十年中, 由于数字集成电路技术的快速发展, 导致需要更复杂的信号处理系统。而电子的模数转换器(EADC)由于“电子瓶颈”的存在, 提高缓慢^[1]。随着激光和其他光学器件的不断改进和成熟, 越来越多的研究者关注于用光子技术实现模数转换(PADC)^[2~4]。PADC的优点在于, 采样脉冲的抖动性

小, 采样的重复频率高, 带宽高, 并且可以方便地利用现有的技术进行复用和解复用。可以广泛应用于雷达、电子战和医学成像等领域。目前, PADC 的研究方向可以分为两类: 全光模数转换^[3~8]和光电混合的模数转换^[9~13]。全光模数转换的采样、量化和编码都是在光域完成的。光电混合的模数转换是使用重复频率较高的光脉冲采样, 利用成熟的解复用技术或者

收稿日期: 2010-03-01; 收到修改稿日期: 2010-05-17

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z219)和国家自然科学基金(60977003)资助课题。

作者简介: 窦玉杰(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事全光信号处理及光模数转换等方面的研究。

E-mail: douyj08@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 姚敏玉(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光通信及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: yaomy@ee.tsinghua.edu.cn

时域展宽技术,降低信号的速率,量化和编码采用 EADC 技术。与全光模数转换技术相比,光电混合转换技术可以利用锁模脉冲源脉宽窄和幅度抖动小的优势^[2],又可以充分利用现有的 EADC 技术,有利于降低成本,增加实施的可能性。光电混合的模数转换器(ADC)根据复用形式的不同,可以分为波分复用型 ADC^[9~11]和时分复用型 ADC^[12~14]。波分复用型的 ADC 是利用多个不同波长的光脉冲对信号进行采样,然后通过波分解复用分为多路处理,缺点是需要多个波长的光源,并要将多个波长在时域上交织,实现难度较大。时分复用型 ADC 是利用频率较高的超短光脉冲串对信号采样,通过时分解复用将信号解复用为多路每路频率较低的信号处理^[12]。随着光电子技术的快速发展,重复频率较高的锁模脉冲激光器(MLL)发展迅速^[15~18],其时间抖动可以达到飞秒量级^[18],可以用作时分复用型 ADC 的超短光脉冲串。

基于时分复用型 ADC 的思想,本文提出了一种基于锁模脉冲源和高速光开关的时分抽样方案。优点是仅使用一个锁模脉冲源,采样脉冲的一致性较好,并且可扩展性高,通过改变高速光开关的频率可以灵活地改变时分解复用后每一路信号的频率。

2 方案和工作原理

在光模数(AD)转换系统中,光脉冲特性的好坏对结果影响很大,多路脉冲复用会有幅度和脉宽不一致的问题,该系统仅使用一个锁模脉冲源,脉冲的一致性较好。原理如图 1 所示,首先是使用高重复频率($n \times f$)窄脉宽的 MLL 通过电光调制器(EOM)对射频(RF)信号进行采样,将采样后的信号通过光耦合器(OC)分为 n 路,从第 2 路开始每一

路加延时,第 2 路延时 $1/(n \times f)$ 秒,……,第 n 路延时 $(n-1)/(n \times f)$ 秒,其中 f 为高速光开关的频率。这时再经过光开关,由于各路光开关的状态是同步的,即每一路经过同步的时间窗口,这样就可以将重复频率为 f 的信号选择出来,从而实现将高重复频率的采样降为多路低重复频率的采样。再经过光电探测器(PD)转换为电信号,对此电信号用 EADC 进行量化编码。

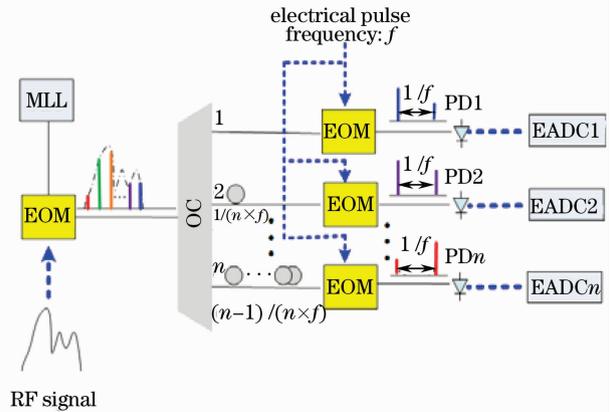


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram

在该系统中,使用 10 Gb/s 的 16 位码长的电码型发生器(EPG)和 EOM 作为高速光开关。该电码型发生器使用 10 GHz 的正弦微波信号做触发,通过改变电码型发生器的码型,如码型为 1010 1010 1010 1010,1000 1000 1000 1000,1000 0000 1000 0000,则可分别得到重复频率为 5,2.5 和 1.25 GHz 的电脉冲,图 2 为通过改变电码型发生器的码型,得到的重复频率 2.5,1.25 GHz 的电脉冲信号,可用于图 1 所示的系统的开关,将高采样率的信号降低为 2.5 GHz 或者 1.25 GHz 的低采样率的信号,以适应现有 EADC 的速率。

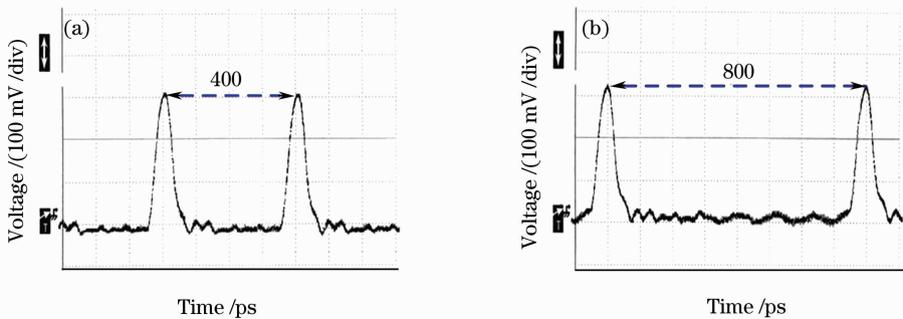


图 2 电码型发生器的输出脉冲。电脉冲重复频率:(a) 2.5 GHz, (b) 1.25 GHz

Fig. 2 Output of electrical pattern generator. (a) electrical pulse with repetition rate of 2.5 GHz, (b) electrical pulse with repetition rate of 1.25 GHz

为了验证这种系统结构的可行性,采用了如图3所示的实验装置。实验中使用重复频率为10 GHz的锁模脉冲源(SOA-EA MLL)作为采样脉冲对射频信号进行采样(使用线性较好的 photline EOM),采样后的脉冲再经过高速光开关将信号解复用为低重复频率的采样信号。这里的光开关是基于电码型发生器和 EOM(高消光比的 covega 铌酸锂调制器)的结构,最终经光电探测器(PD)转换为电信号通过数字采样示波器(DSO)观察。

作为采样光脉冲的10 GHz锁模脉冲源输出的光脉冲如图4(a)所示,脉宽较窄约为11 ps。若电码型发生器的码型为1000 0000 1000 0000,即电码型发生器输出电脉冲的重复频率为1.25 GHz,光开关的重复频率也为1.25 GHz。图4(b)为10 GHz的光脉冲经过1.25 GHz高速光开关后选出来的

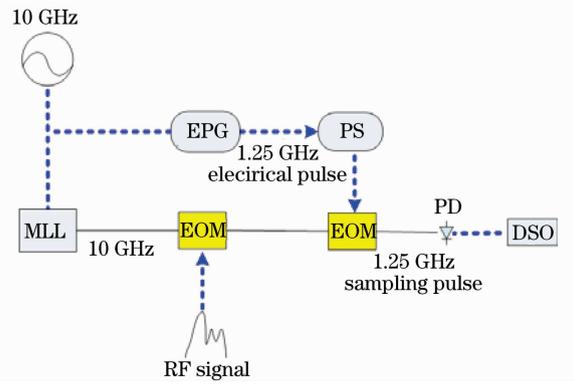


图3 实验装置

Fig.3 Experimental setup

1.25 GHz重复频率的光脉冲。由图4(b)可以看出,此基于电码型发生器和铌酸锂调制器的光开关结构可以准确地将高重复频率的采样脉冲解复用为多路低重复频率的脉冲,并且具有较高的消光比。

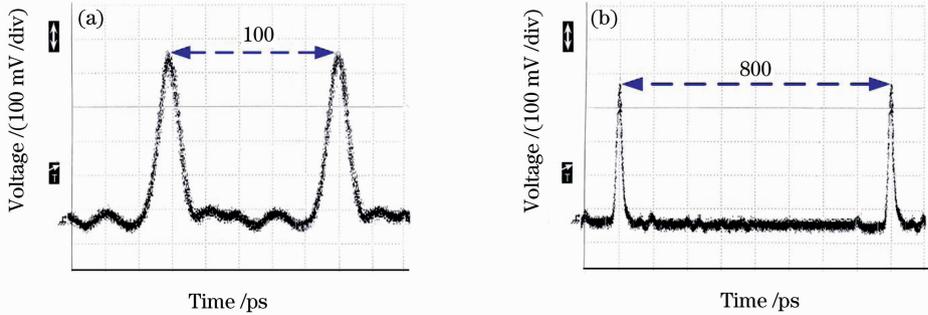


图4 (a)锁模脉冲源的输出, (b)经过光开关后选出来的1.25 GHz的脉冲

Fig.4 (a) Mode-locked-pulse, (b) 1.25 GHz pulse acquired through high-speed optical switch

在时分解复用系统中,光开关的消光比对采样信号的信噪比(SNR, R_{SN})有很大影响,如图5(a)所示,用光开关解复用出来的信号(电码型发生器的码型对应为“1”的位)的幅度为A,噪声(电码型发生器的码型对应为“0”的位)的幅度为B,定义系数 $C =$

B/A ,用以仿真采样得到信号的信噪比与光开关的消光比的关系。由此定义可知, C 的值越小,光开关的消光比越高,得到的信号的信噪比越高。图5(b)是用Matlab仿真出来的信噪比随系数 C 的变化曲线。由图4(b)可以看出,此开关的消光比较高,按

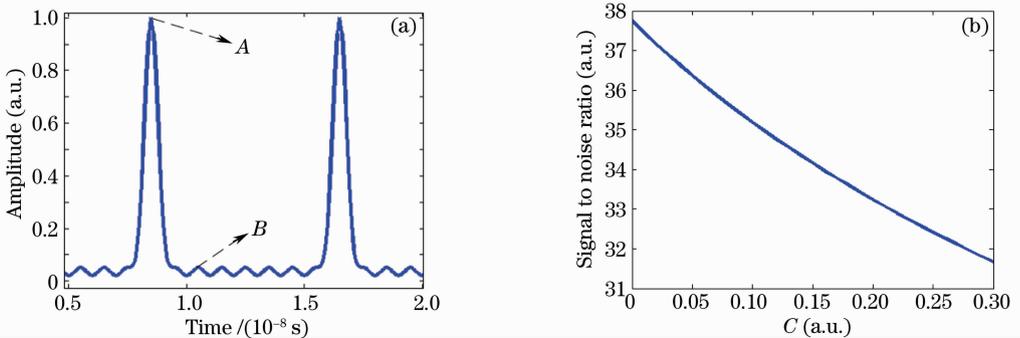


图5 Matlab仿真图。(a) 1.25 GHz重复频率的脉冲, (b) 信噪比随系数C的变化曲线

Fig.5 Matlab simulation figure. (a) pulse with repetition rate of 1.25 GHz, (b) signal to noise ratio versus the coefficient of C

照定义的系数 $C \leq 0.05$ 。由仿真曲线可以知道,当 $C=0.05$ 时,系统的信噪比可以达到 36.37 dB,等效于 5.75 bit 的有效比特数。但是由于系统其他因素的影响,实际的测量结果要比仿真得到的差一些。

由分析可以看出,此系统可以准确地将高采样率的信号解复用为多路低采样率的信号进行并行处理。系统仅使用一个锁模脉冲源即可实现高重复频率(10 GHz)的采样,并且可以灵活地通过改变电码型发生器的码型来改变光开关的开关频率,即可以改变解复用后每一路信号的频率。例如,若光开关的开关频率为 1.25 GHz,可将其解复用为 8 路每路重复频率为 1.25 GHz 的信号,若光开关的开关频率为 2.5 GHz,则可以解复用为 4 路每路重复频率为 2.5 GHz 的信号。

3 实验结果及分析

为了测试这套系统的性能,采用了 Agilent Infiniium 91304 实时示波器记录了多个频率的微波信号采样数据,并进行了分析。图 6 为实时示波器记录的采样点以及根据采样点拟合出来的时域信号,其中图 6(a)~(d)分别是采样频率为 50,100,250 和 500 MHz 的采样信号。由图可以看出每个频率的采样数据都能与拟合曲线较好地吻合。

经过傅里叶变换得到了很好的频谱图,图 7(a)~(d)分别是采样信号频率为 50,100,250 和 500 MHz 的信号频谱图。

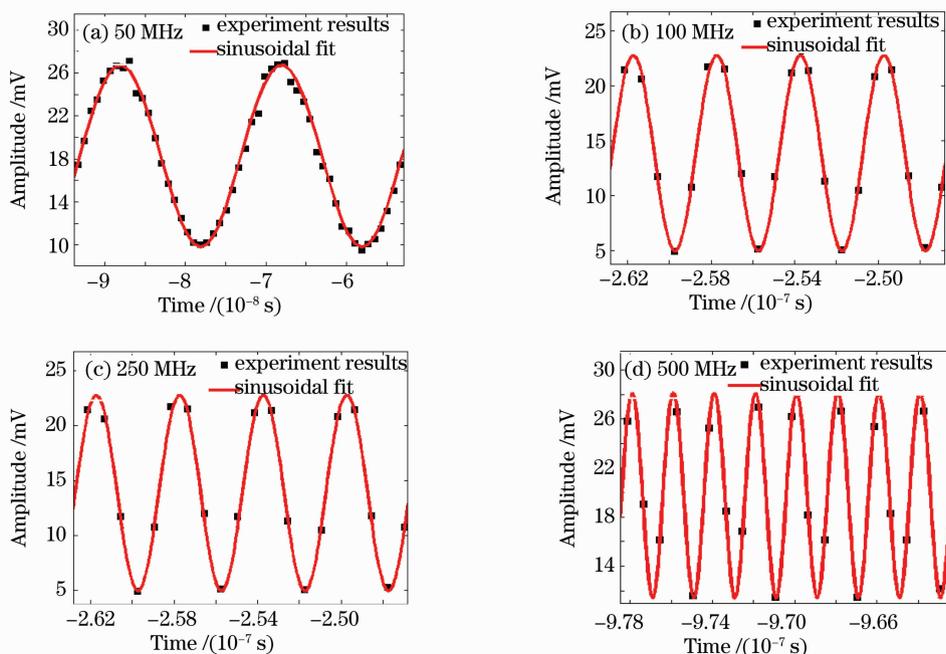


图 6 采样数据与拟合曲线
Fig. 6 Sampled data and sinusoidal fit

采用 IEEE std. 1057^[19] 所述的标准算法对得到的数据进行分析,以 50 MHz 信号为例。利用图 6(a)实验得到的离散数字值(图中点线)以及计算得到的拟合正弦曲线(图中实线)。若不考虑采样后信号的非线性,信噪比可由(1),(2)式计算得出^[19]

$$N = \left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (x[n] - x'[n])^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$R_{SN} = A_{rms} / N, \quad (2)$$

式中 $x[n]$ 为采样数据[图 6(a)的点线]; $x'[n]$ 为拟合得到的正弦曲线[图 6(b)的实线]; M 为采样的点数; A_{rms} 为信号的均方根。

有效比特数为^[2]

$$f_{ENOB} = \frac{R_{SN} - 1.76}{6.02}. \quad (3)$$

根据公式计算得出当采样信号的频率为 50 MHz 时信噪比为 $R_{SN} = 32.02$ dB,对应的有效比特数为 $f_{ENOB} = 5.03$ bit。

4 结 论

提出了一种基于锁模脉冲源和高速光开关的时分抽样系统,该系统首先使用高重复频率的脉冲采样,然后利用高速光开关解复用为并行的多路低重

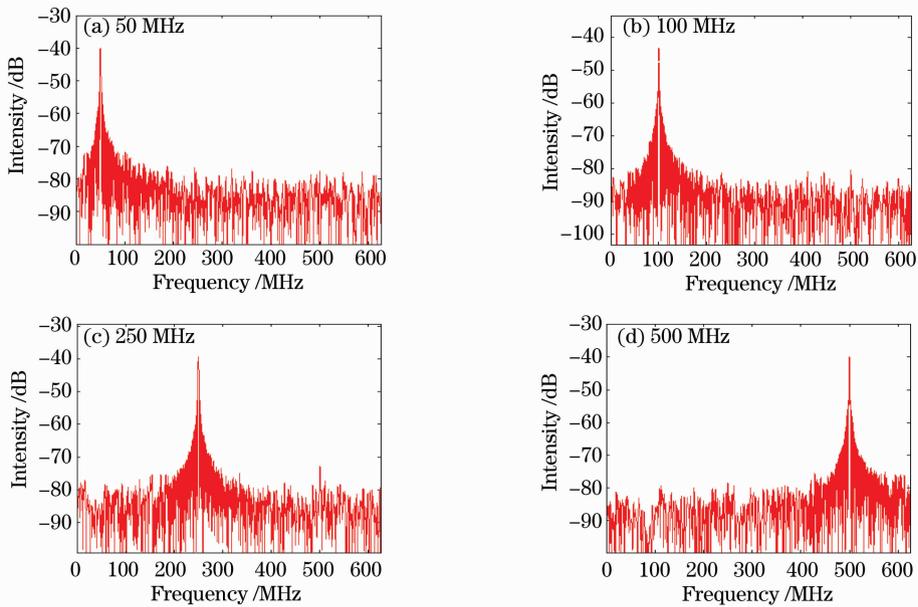


图 7 频谱图

Fig. 7 Spectra of the recovered signal

复频率的信号,量化和编码在电域完成,可以利用现有的 EADC 技术。实验验证该方案得到了较好的结果,信噪比可达 32.02 dB,相应的有效比特数为 5.03 bit。

致谢 对 Agilent 公司提供的实时示波器表示感谢。同时,也感谢 Agilent 公司的程卫国、李凯两位工程师对本课题给予的有益讨论和大力帮助。

参 考 文 献

- 1 R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999, **17**(4): 539~550
- 2 G. C. Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 1955~1982
- 3 Y. Peng, H. Zhang, Q. Wu *et al.*. Adaptive thresholding scheme in photonic analog-to-digital conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(14): 2201~2203
- 4 W. Li, H. Zhang, Q. Wu *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 625~627
- 5 Q. Wu, H. Zhang, M. Yao *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion using inherent multiwavelength phase shift in LiNbO₃ phase modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 1036~1038
- 6 Q. Wu, H. Zhang, Y. Peng *et al.*. 40 GS/s optical analog-to-digital conversion system and its improvement [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 9252~9257
- 7 Peng Yue, Zhang Hongming, Wu Qingwei *et al.*. Phase-shifted photonic analog-to-digital converter by using fiber squeezer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 748~751
彭越,张洪明,吴庆伟等.利用光线挤压器实现的移相光模数转换器[J].中国激光,2010,**37**(3):748~751
- 8 Zhang Zhuangqian, Zhang Hongming, Fu Xin *et al.*. A new

approach for analog to digital conversion based on double parallel optical intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 378~382

章壮前,张洪明,傅鑫等.一种采用并行光强度调制器的模数转换方法[J].中国激光,2008,**35**(3):378~382

- 9 Fu Xin, Zhang Hongming, Zhang Yuancheng *et al.*. Optoelectronic hybrid ADC based on time-interleaved multi-wavelength pulse generation [J]. *J. Tsinghua University*, 2010, **50**(1): 83~85
傅鑫,张洪明,张圆成等.基于时域交织多波长脉冲产生的光电混合 ADC [J].清华大学学报,2010,**50**(1):83~85
- 10 M. P. Fok, K. L. Lee, C. Shu *et al.*. 4×2.5 GHz repetitive photonic sampler for high-speed analog-to-digital signal conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 876~878
- 11 W. Ng, L. Luh, D. Persechini *et al.*. Ultra-high speed photonic analog-to-digital conversion technologies [C]. *SPIE*, 2004, **5435**: 171~177
- 12 Zhang Hongming, Yao Minyu, Zhang Jianfeng *et al.*. Optical A/D conversion by time-interweaved sampling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12): 1096~1098
张洪明,姚敏玉,张剑锋等.光时分抽样 A/D 转换 [J].中国激光,2001,**A28**(12):1096~1098
- 13 J. A. Bell, M. C. Hamilton, D. A. Leep *et al.*. Optical sampling and demultiplexing applied to A/D conversion [C]. *SPIE*, 1991, **1562**: 276~280
- 14 R. C. Williamson, R. D. Younger, P. W. Juodawlkis *et al.*. Precision calibration of an optically sampled analog-to-digital converter [C]. Digest of IEEE LEOS Summer Topical Meeting on Photonic Time/Frequency Measurement and Control, 2003, **1**: 22~23
- 15 Zhang Chi, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Mode-locked large-mode-area photonic crystal fiber laser with simple cavity configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 100~103
张弛,胡明列,宋有建等.简化腔结构的大模场面积光纤锁模激光器[J].中国激光,2009,**36**(1):100~103
- 16 Cai Yue, Yang Weijian, Zhou Chun *et al.*. Femtosecond erbium-doped fiber laser mode-locked with a high modulation depth

- SESAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3121~3123
蔡岳, 杨晔建, 周春等. 基于金属/介质混合反射镜的高调制深度半导体可饱和吸收镜锁模的飞秒光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3121~3123
- 17 Chen Shengping, Lin Dongfeng, Hou Jing *et al.*. Passively mode locked Yb-doped fiber laser with nearly 2 W average output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2817~2821
陈胜平, 林东风, 侯静等. 平均功率近 2 W 的被动锁模皮秒掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2817~2821
- 18 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 163~165
王旌, 张洪明, 张巍等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 163~165
- 19 IEEE Std 1057 - 1994 (R2001) [S]. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders (Revision of Trial-Use Std 1057-1989), 2001