

基于非线性光纤环形腔镜的全光阈值器

李 强 王 智 吴重庆 王 甫 孙振超 乐燕思 刘岚岚

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 基于非线性光纤环形腔镜(NOLM)及光子晶体光纤(PCF)的自相位调制效应(SPM),实现了一种适用于光子神经元的全光阈值器。所使用的PCF非线性系数为 $16.98 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$,同时在NOLM中引入可调隔离器。PCF及可调隔离器的使用,缩短了NOLM的腔长,同时降低了阈值器对输入光功率的要求。该全光阈值器对光信号的消光比可提高6 dB以上。由于全光阈值器中所有的组成器件均为无源光器件,因此能够处理高速率光信号。该全光阈值器在其他光通信系统中也具有广阔的应用前景。

关键词 光纤光学;全光阈值器;非线性光纤环形腔镜;光子晶体光纤;光子神经元

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0705001

All-Optical Thresholder Based on Nonlinear Optical Loop Mirror

Li Qiang Wang Zhi Wu Chongqing Wang Fu Sun Zhenchao Le Yansi Liu Lanlan

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract An all-optical thresholder based on the nonlinear optical loop mirror (NOLM) and the self-phase modulation (SPM) of photonic crystal fibers (PCF) which can be used in photonic neuron is achieved. The nonlinear coefficient of PCF is $16.98 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$, while a tunable isolator into the NOLM is also introduced. Due to the use of highly nonlinear PCF and tunable isolator, it requires shorter cavity length and lower input power. By using the all-optical thresholder, optical signal extinction ratio can improve more than 6 dB. All devices in the all-optical thresholder are passive, therefore it is good for high speed optical signals. The all-optical thresholder also has broad application for other optical communication systems.

Key words fiber optics; all-optical thresholder; nonlinear optical loop mirror; photonic crystal fiber; photonic neuron

OCIS codes 060.2310; 060.4370; 060.7140; 230.1150

1 引 言

神经网络在自适应控制、机器学习、认知、运动控制等领域具有重要应用。光学因其高带宽、高度并行、能快速处理大量信息、能耗低等优点,是实现神经网络的理想方式。2009年,普林斯顿大学的Rosenbluth等^[1]第一次在光纤光路中利用全光方式实现了光子神经元,该光子神经元具有太赫兹的信息处理速率,是生物神经元的 10^8 倍,显示出强大的竞争力。Rosenbluth等人对光子神经元进行了系统的研究,实现了同步^[1-4]、异步^[5-6]工作方式,同时首次利用全光方式实现了光子神经元的尖峰时序依赖可塑性(STDP)学习机制^[7]。光阈值器是光子神经元的核心器件之一。近年来,研究人员提出了基于半导体放大器(SOA)^[8]、非线性频谱转换^[9-10]、

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61378061)、北京市自然科学基金(4132035, 4144080)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032)

作者简介: 李 强(1991—),男,博士研究生,主要从事光纤通信、光纤传感、全光信号处理等方面的研究。

E-mail: qiangli@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子集成、光纤通信、光纤传感、全光信号处理及全光网等方面的研究。E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

非线性光纤环形腔镜(NOLM)^[11-13]等的光阈值器件。其中,基于SOA的阈值器,信息处理速率受制于载流子寿命;而基于非线性频谱转换的阈值器,需要搭配使用滤波器,仅适用于单波长情况^[12];基于NOLM的光阈值器通过引入单向衰减器件,降低了所需的光功率和非线性器件长度,但文献[11]中使用的高非线性光纤为1 km,腔长过长,实用价值低,而文献[12-13]中所用高非线性光纤非线性较小,仍需较大输入光功率。

本文简要介绍了光子神经元的基本结构及其关键器件,使用光子晶体光纤(PCF)作为非线性器件,实现了一种基于NOLM的全光阈值器,有效缩短了NOLM的腔长,同时在NOLM中引入可调隔离器,降低了阈值器的阈值功率。分析了全光阈值器的基本原理,并对全光阈值器进行了实验测试。实验结果表明,该全光阈值器对光信号的消光比可以提高6 dB以上,有效改善了信号质量,且能对不同消光比的信号进行阈值处理,适用于光子神经元及其他光通信系统中。

2 光子神经元

神经元具有多输入单输出,整合激发,记忆和学习等特性。一个完整的光子神经元包括权重(G)、延迟(T)、时空整合、阈值、反相等结构^[2],如图1所示。

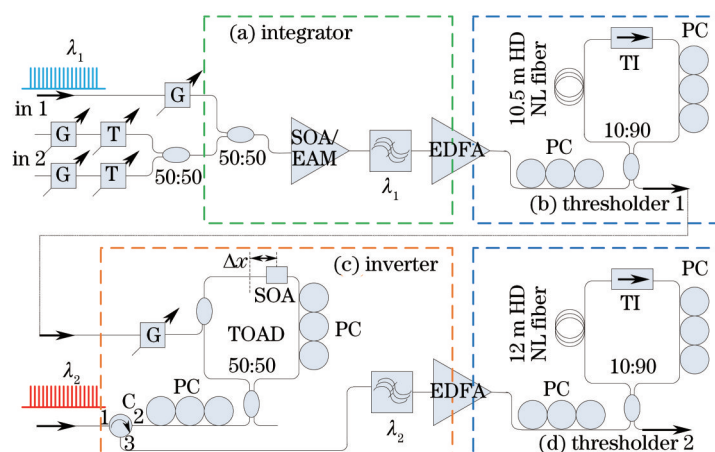


图1 光子神经元模型

Fig.1 Photonic neuron model

权重,即神经元之间的联系效率,可通过可调衰减器或铌酸锂调制器调节^[2];延迟可通过电光开关选择不同长度的光纤或使用低损耗的机械式微机电系统(MEMS)开关实现^[2];空间整合使用光纤耦合器实现^[2]。

目前,实现神经元时间整合功能的积分器有两种,分别为SOA^[11-31]和电致吸收调制器(EAM)^[3-6],基于SOA的交叉增益调制(XGM)及EAM的交叉吸收调制(XAM)效应,可使用不同于输入信号波长的小功率采样光 λ_1 对积分器载流子密度进行采样,实现积分器的输出。

基于NOLM的阈值器,其核心器件为高掺杂(HD)非线性(NL)光纤及可调隔离器(TI),通过构建依赖于输入光功率的非线性相移,改变输出光功率和输入光功率的关系^[12]。阈值器的阈值由非线性器件的总非线性系数及耦合器的分光比决定,是固定的,但可在阈值器前放置掺铒光纤放大器(EDFA),通过调整EDFA的增益来实现阈值器的阈值调整。NOLM中还包含一个偏振腔控制器(PC),用于偏振态的控制。

SOA作为积分器模拟兴奋刺激时,由于XGM效应,具有反相作用,相当于一个非门,因此需在其后加入反相器。反相器基于太赫兹非对称解复用器(TOAD),其结构如图1(c)所示,也是一个NOLM环,利用了SOA的交叉相位调制(XPM)效应^[2,14-15],其中输入为一时钟信号(λ_2)。使用环形器(C),将从TOAD的输入端口输出的信号作为下一级的输入信号。TOAD会使信号的对比如降低,因此需要在其后加上阈值器。EAM作为积分器时则不需要反相器。

3 全光阈值器

基于NOLM使用PCF作为非线性器件实现的全光阈值器如图2所示,包含偏振控制器(PC1, PC2)、TI、PCF和90:10光纤耦合器,其基本思想与文献[12]中相同,其核心器件为可调隔离器和PCF。

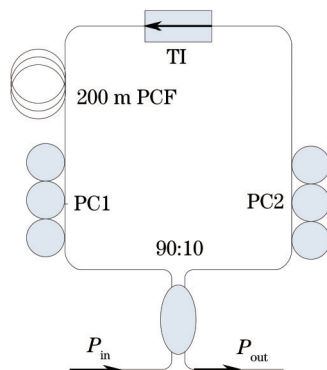


图 2 全光阈值器结构

Fig.2 All-optical thresholder layout

3.1 可调隔离器

光隔离器是只允许单向光通过的无源光器件,基于法拉第磁旋转效应的非互易性,如图 3(a)所示。由外加磁场引起的旋转角 $\alpha = \nu B d$,其中 ν 为物质的韦尔代常数, B 为磁场朝着光波传播方向的分量, d 为光波与磁场相互作用的长度。可以通过外加磁场改变法拉第旋转角,从而改变光隔离器的单向损耗。可调隔离器的结构如图 3(b)所示,所用光隔离器的隔离度为 21.92 dB,环形磁铁固定于微位移平台上,微位移平台行程为 15 mm,位移精度为 0.005 mm。改变环形磁铁与光隔离器的相对位置,即相当于改变了施加于光隔离器的磁场大小,可以实现光隔离器单向损耗的调整。实验测得,该可调光隔离器隔离度的可调范围为 9.20 dB ~ 32.73 dB,插入损耗可调范围为 0.29 dB~2.21 dB,隔离度及插入损耗随着微位移平台位移的变化如图 4 所示,通过改变隔离器与环形磁铁的初始相对位置或改变磁场大小,可实现更大范围的单向损耗调整。

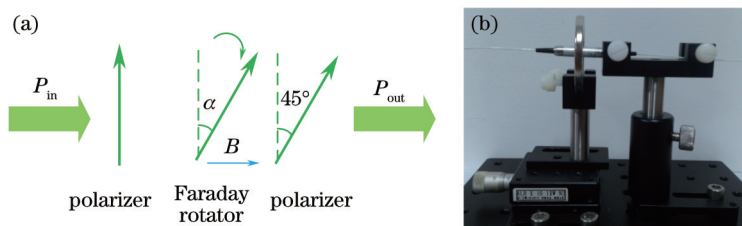


图 3 (a) 隔离器原理图; (b) 可调隔离器结构

Fig.3 (a) Principle of isolator; (b) tunable isolator layout

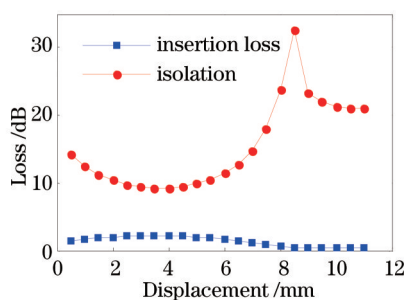


图 4 可调隔离器插入损耗及隔离度变化范围

Fig.4 Tunable range of tunable isolator's insertion loss and isolation

3.2 PCF

在 NOLM 中使用的非线性介质为大空气孔全内反射型(TIR)PCF,扫描电子显微镜(SEM)照片如图 5(a)所示,包层直径 $D=125 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d=4.4 \mu\text{m}$,节距 $\Lambda=4.8 \mu\text{m}$ 。实验测得,在 1550 nm 处,其非线性系数为 $16.98 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$,损耗为 45 dB/km,色散约为 $80 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})^{[16]}$ 。经计算,光子晶体光纤的总非线性系数与其长度关系如图 5(b)所示,当 PCF 的长度大于 100 m 时,其总非线性系数趋于常数。在实验室中,使用 200 m 的 PCF 进行全光阈值器的测试,其总非线性系数 $\Gamma=0.377 \text{ W}^{-1}$ 。

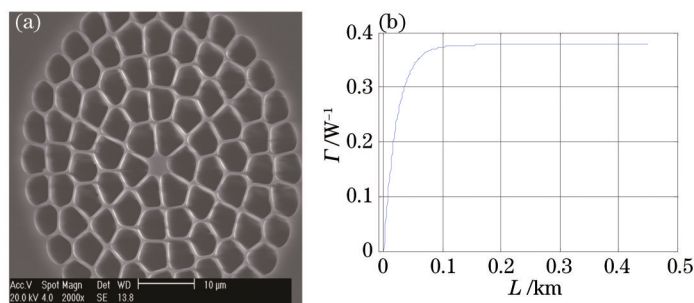


图5 (a) PCF的电子显微镜图; (b) PCF的总非线性系数与其长度关系

Fig.5 (a) SEM image of the PCF; (b) function of PCF's nonlinear coefficient and its length

PCF具有较大的双折射,会引起偏振模色散(PMD),导致脉冲展宽或分裂成两个脉冲。使用脉冲时延法^[17]对PCF的PMD进行测量,结果如图6所示,输入脉冲为半峰全宽为100 ps的高斯脉冲,测量得到脉冲时延 $\Delta\tau=200$ ps。

$$\Delta n = |n_x - n_y| \frac{\Delta\tau c}{L}, \quad (1)$$

式中 $n_i(i=x,y)$ 为 i 偏振模的有效折射率, L 为 PCF 的长度, c 为真空中光速。由(1)式可知其双折射 $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$, 对应的 PMD 约为 1000 ps/km。PCF 引起的 PMD 可通过调整偏振控制器来降低其对实验结果的影响。

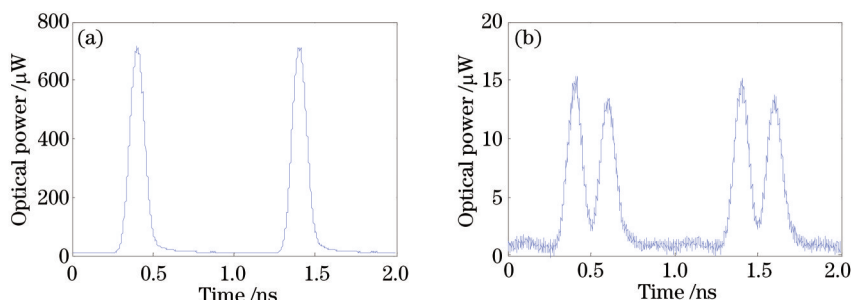


图6 (a) 初始输入脉冲; (b) 经 200 m PCF 后输出脉冲

Fig.6 (a) Initial input pulses; (b) output pulses through 200 m PCF

3.3 全光阈值器原理

选用分光比为 $\alpha:(1-\alpha)$ ($\alpha > 0.5$) 的耦合器,假设存在很小的振幅误差 δ 与相位误差 φ_e ,则顺时针(CW)与逆时针(CCW)方向由于 PCF 的 SPM 效应引起的非线性相移 $\varphi_{\text{CW}} = \alpha \Gamma P_{\text{in}}$, $\varphi_{\text{CCW}} = (1-\alpha) \Gamma P_{\text{in}}$,与光功率成正比^[18]。当 CW、CCW 到达光纤耦合器时,光功率分别为 kP_{in} , $(k+\delta)P_{\text{in}}$,其中 k 为与 α 及 NOLM 中损耗相关的系数。基于 NOLM 的基本原理^[19],可推出全光阈值器的输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 之间的关系式为^[12]

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \{ \sqrt{k} \exp[i(\varphi_e + \varphi_{\text{CW}})] - \sqrt{k+\delta} \exp(i\varphi_{\text{CCW}}) \} \{ \sqrt{k} \exp[-i(\varphi_e + \varphi_{\text{CW}})] - \sqrt{k+\delta} \exp(-i\varphi_{\text{CCW}}) \} = P_{\text{in}} [2k + \delta - 2\sqrt{k(k+\delta)} \cos(\varphi_e + \varphi_{\text{CW}} - \varphi_{\text{CCW}})]. \quad (2)$$

将(2)式进行泰勒展开可得

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \left(k\Delta\varphi^2 + 2k\Delta\varphi\varphi_e + k\varphi_e^2 + \frac{\delta}{4k} \right) = k(2\alpha - 1)^2 \Gamma^2 P_{\text{in}}^3 + 2k(2\alpha - 1) \Gamma \varphi_e P_{\text{in}}^2 + \left(k\varphi_e^2 + \frac{\delta^2}{4k} \right) P_{\text{in}}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_{\text{CW}} - \varphi_{\text{CCW}} = (2\alpha - 1) \Gamma P_{\text{in}}$ 。当 $\Delta\varphi \geq \sqrt{4\varphi_e^2 + \frac{\delta^2}{4k^2}}$ 时,(3)式中三次项起主要作用,此时可实现阈值作用^[12]。

4 实验测试

图7为全光阈值器测试实验装置图。利用脉冲码型发生器(PPG)产生速率为10 GHz,占空比为0.1的高斯调制信号,对1550 nm 分布式反馈(DFB)激光器的输出光进行调制,可得到半峰全宽为100 ps的高斯脉冲,实验测得,其峰值光功率约为平均光功率的5.8倍,下文中未特别说明的光功率均指平均光功率。将图7中A端口的输出信号直接输入到B端口,对全光阈值器的阈值特性进行测量,测量结果如图8所示。图8(a)为直角坐标系下输出光功率与输入光功率之间的关系,拟合方程为 $P_{\text{out}} = 1609P_{\text{in}}^3 + 606.5P_{\text{in}}^2 - 58.13P_{\text{in}}$, $R^2 = 0.9987$,其中 R 为相关系数;图8(b)为对数坐标系下输出光功率与输入光功率之间的关系,当输入阈值器的光

功率为 0~90 mW、90~150 mW 和大于 150 mW 时,输出光功率与输入光功率分别成线性、二次和三次关系。因此当输入光功率大于 150 mW 时,可实现阈值作用。

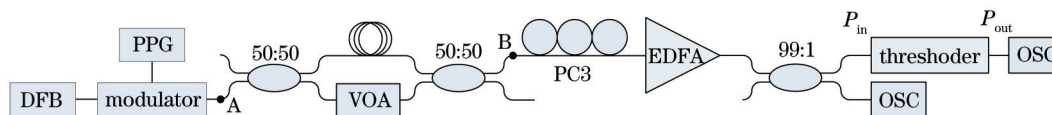


图 7 全光阈值器测量实验装置

Fig.7 Experimental setup for measuring the all-optical thresholder

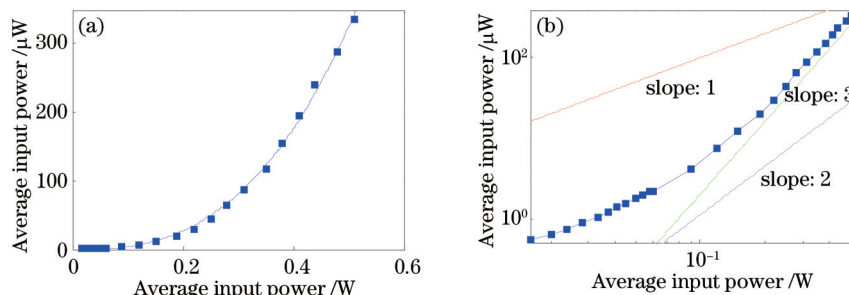


图 8 阈值器输出特性曲线。(a) 直角坐标系; (b) 对数坐标系

Fig.8 Output character curves of all-optical thresholder. (a) In rectangular coordinate; (b) in logarithmic coordinates

进行全光阈值器性能测试时, A 端口输出的光信号经一个 3 dB 耦合器分成两路, 其中一路通过可调衰减器(VOA), 另一路通过光纤延迟线, 两路信号再经一个 3 dB 耦合器耦合输出。调整 VOA, 分别得到消光比为 4.63 dB、3.12 dB 和 1.26 dB 的光信号, 如图 9(a)~(c)所示。将得到的光信号分别输入 B 端口, 经 EDFA 放大后其平均功率达到 190 mW, 再输入到阈值器中, 使用数字示波器(OSC)对输出信号进行观测。得到输出信号如图 9(d)~(f)所示, 输出信号消光比分别为 12.68 dB、9.25 dB 和 7.64 dB, 消光比增幅大于 6 dB, 信号质量有明显改善, 并且在一定范围内随着 EDFA 增益的增加, 其消光将得到更大的提高。

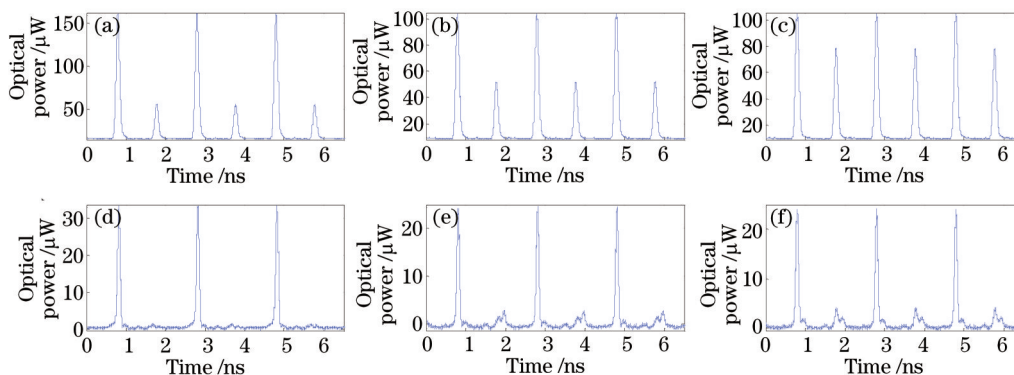


图 9 全光阈值器测试结果

Fig.9 Thresholder's test results

由于使用的阈值器输入信号是半峰全宽为 100 ps, 占空比为 0.1 的高斯脉冲, 其峰值功率较小, 因此全光阈值器所需的输入光功率仍较大。若使用更窄的光脉冲输入, 当经 EDFA 放大后得到与之相同的输出光功率时, 相当于增加了光脉冲的峰值功率, 将有效降低全光阈值器所需的输入光功率。

5 结 论

基于 NOLM 的基本原理, 实现了一种可用于光子神经元的全光阈值器。使用 200 μm 的大空气孔全内反射型 PCF 作为非线性介质, 其非线性系数为 $16.98 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}$, 损耗为 45 dB/km, 在实际应用中, 可以使用较短的 PCF, 能有效降低阈值器的损耗。利用 PCF 的 SPM 效应及使用自制的可调隔离器, 在 NOLM 中构建强度依赖且不对称的非线性相移, 从而实现阈值作用。使用半峰全宽为 100 ps, 占空比为 0.1 的高斯脉冲对该全光阈值器的输出特性及性能进行了实验测试。实验结果表明: 当输入阈值器的光功率为 0~90 mW、90~150 mW 和

大于 150 mW 时,输出光功率与输入光功率分别成线性、二次和三次关系,该全光阈值器的阈值功率在 150 mW 左右,对应峰值光功率约为 870 mW;当输入信号的平均光功率为 190 mW 时,输入光信号的消光比可实现 6 dB 以上的提高,实现了优良的阈值特性。该阈值器不仅可应用与光子神经元中,在其他光通信系统中也具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Rosenbluth D, Kravtsov K, Fok M P, *et al.*. A high performance photonic pulse processing device[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22767–22772.
- 2 Kravtsov K S, Fok M P, Prucnal P R, *et al.*. Ultrafast all-optical implementation of a leaky integrate-and-fire neuron[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2133–2147.
- 3 Fok M P, Tian Y, Rosenbluth D, *et al.*. Optical hybrid analog-digital signal processing based on spike processing in neurons[C]. *SPIE Optics and Photonics for Information Processing V*, 2011, 8134: 813402.
- 4 Fok M P, Deming H, Nahmias M, *et al.*. Signal feature recognition based on lightwave neuromorphic signal processing[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(1): 19–21.
- 5 Tian Y, Fok M P, Rosenbluth D, *et al.*. Asynchronous spiking neuron based on four-wave mixing and cross absorption modulation[C]. *Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, 2012: OTh3H.1.*
- 6 Fok M P, Tian Y, Rosenbluth D, *et al.*. Asynchronous spiking photonic neuron for lightwave neuromorphic signal processing[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3309–3311.
- 7 Fok M P, Tian Y, Rosenbluth D, *et al.*. Pulse lead/lag timing detection for adaptive feedback and control based on optical spike-timing-dependent plasticity[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 419–421.
- 8 Deng K L, Glesk I, Kang K I, *et al.*. Unbalanced TOAD for optical data and clock separation in self-clocked transparent OTDM networks[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1997, 9(6): 830–832.
- 9 Lee J H, Teh P C, Yusoff Z, *et al.*. A holey fiber-based nonlinear thresholding device for optical CDMA receiver performance enhancement[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2002, 14(6): 876–878.
- 10 Wang X, Hamanaka T, Wada N, *et al.*. Dispersion-flattened-fiber based optical thresholder for multiple-access-interference suppression in OCDMA system[J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5499–5505.
- 11 Striegler A G, Meissner M, Cvecek K, *et al.*. NOLM-based RZ-DPSK signal regeneration[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2005, 17(3): 639–641.
- 12 Kravtsov K, Prucnal P R, Bubnov M M. Simple nonlinear interferometer-based all-optical thresholder and its applications for optical CDMA[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 13114–13122.
- 13 Chen Yinfang, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Experimental demonstration of measuring optical threshold in nonlinear optical loop mirror based on variable pulse duty cycle[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0605004.
陈寅芳,王 荣,蒲 涛,等.变占空比脉冲测量非线性光环镜阈值特性的实验研究[J].*中国激光*, 2012, 39(6): 0605004.
- 14 Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I, *et al.*. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 1993, 5(7): 787–790.
- 15 Sun Zhenchao, Wang Zhi, Liu Lanlan, *et al.*. Key techniques for all optical repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0105008.
孙振超,王 智,刘岚岚,等.全光伪随机码倍速关键技术[J].*中国激光*, 2014, 41(1): 0105008.
- 16 Zhang Limei, Wang Zhi, Yu Kuanglu, *et al.*. Influence of light source stability on evolution of beat signal in nonlinear photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(4): 895–900.
张丽梅,王 智,余靓球,等.光源的稳定性对拍信号在非线性光子晶体光纤中演化的影响[J].*中国激光*, 2009, 36(4): 895–900.
- 17 Yang Guangqiang, Zhang Xia, Lin Jianfei, *et al.*. The Measurement of polarization mode dispersion in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1133–1136.
杨广强,张 霞,林健飞,等.高双折射光子晶体光纤偏振模色散测量[J].*光子学报*, 2005, 34(8): 1133–1136.
- 18 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 5th edition. Waltham, Massachusetts: Academic Press, 2013.
- 19 Doran N J, Wood D. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(1): 56–58.