

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506006

# 光纤激光器中基于偏振控制器的脉宽可调平顶光脉冲生成技术

陈金华<sup>1</sup>, 方晓惠<sup>2</sup>, 丁志群<sup>3</sup>, 赵红霞<sup>3</sup>

(1 华南农业大学 理学院, 广州 510640)

(2 广州大学 物理与电子工程学院, 广州 510006)

(3 宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**提出了主动锁模联合非线性偏振旋转光纤激光器中基于偏振控制器的脉宽可调平顶光脉冲生成技术. 光纤激光器由主动锁模部分和一根掺 Bi 的高非线性光纤联合两个偏振控制器及光纤检偏器构成的非线性偏振旋转结构组成. 分析了该实验装置在不同状态下的工作机制, 通过调节激光器中的两个偏振控制器, 实验获得了 10 GHz 的脉宽可调平顶光脉冲, 脉宽调节范围在 12~19 ps 之间, 调节激光腔中的宽带滤波器, 可在不同波长处获得平顶光脉冲. 实验表明: 输出的平顶光脉冲性能稳定, 边模抑制比为 65 dB, 定时抖动 145 fs.

**关键词:**平顶光脉冲整形; 脉宽可调; 偏振控制器; 主动锁模; 非线性偏振旋转

中图分类号: TH74; O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0506006-5

## Flat-top Pulse Generation with Pulsewidth Tunable Based on Polarization Controller in Fiber Laser

CHEN Jin-hua<sup>1</sup>, FANG Xiao-hui<sup>2</sup>, DING Zhi-qun<sup>3</sup>, ZHAO Hong-Xia<sup>3</sup>

(1 Department of Physics, Agricultural University of South China, Guangzhou 510640, China)

(2 School of Physics and Electronics Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510640, China)

(3 School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315211 China)

**Abstract:** A pulsewidth tunable 10 GHz flat-top pulse train was generated based on the combined action of active mode locking and nonlinear-polarization-rotation pulse shaping. The laser cavity consisted of two parts: one was a commonly used active-mode-locking fiber laser; the other was for NPR based pulse shaping, which was composed of two PCs between which a high nonlinear fiber was inserted, and an in-line polarizer, was inserted into the cavity to control the pulse shape. The setup has previously been used for pulse compression, while the generation of FTP was proposed based on it. As a result, 10 GHz flat-top pulse with pulsewidth tunable from 12~19 ps by tuning polarization controllers was generated, and flat-top pulse were obtained at different wavelength by tuning band pass filter. The output pulse shows good stability, with the measured side mode suppress ratio of 65 dB and the timing jitter of 145 fs.

**Key words:** Flat-top pulse shaping; Pulsewidth tunable; Polarization controller; Active mode locking; Nonlinear polarization rotation

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.3510; 060.4374; 190.4370

基金项目: 广东省自然科学基金(No. S2013010014807)、浙江省自然科学基金(No. Y1100876)和广州大学启动资金(No. FXH1-101001)资助  
第一作者: 陈金华(1965-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为光脉冲技术. Email: chnjh@scau.edu.cn  
通讯作者: 方晓惠(1970-), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光技术、光信号处理技术. Email: xhfang402@hotmail.com  
收稿日期: 2013-08-22; 录用日期: 2013-12-09

## 0 引言

高速光纤通信中,由于光脉冲越来越窄(几个 ps),光脉冲的抖动对解复用误码率的影响问题将变得越来越尖锐.把具有类似高斯脉冲包络的信号进行整形,变成平顶脉冲(Flat-Top Pulse, FTP)或者方波脉冲,以增大每个信号 bit 解复用的时间窗口,从而降低误码率无疑是一种简单、可行且成本较低的方法,越来越受到研究人员的关注<sup>[1-2]</sup>.平顶光脉冲整形技术可归纳为:1)体光栅及液晶调制器联合作用,通过对液晶屏面各个像素点的光强进行强度和相位调制,理论上可以得到任意形状的脉冲<sup>[3-6]</sup>;2)在超结构光纤光栅平顶光脉冲整形技术中,光脉冲经过该光栅的反射谱包络具有 sinc 函数形状,根据傅里叶变化可知在时域上能够得到方波脉冲输出<sup>[1-2,7-8]</sup>;3)利用长周期光纤光栅作为微分器对光脉冲整形得到平顶脉冲,且脉冲可以做到很窄(2 ps)<sup>[9-10]</sup>;4)利用非线性环形镜的双波作用获得脉宽较短的平顶光脉冲<sup>[11-12]</sup>.这些方法均是对高斯型的数据信号进行整形,且各有利弊,但共同缺点是整形装置只能输出固定波长及固定脉宽的平顶脉冲,不利于对不同波长,不同速率的光信号进行整形.本文提出了基于主动锁模联合非线性偏振旋转的脉宽可调平顶光脉冲生成技术.光纤激光器包括两部分:一部分由高功率掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier, EDFA),调制器及宽带滤波器组成的主动锁模部分,另一部份则是由一根掺 Bi 的高非线性光纤联合两个偏振控制器及光纤检偏器构成的非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)结构.该光纤激光器装置曾被用于脉冲压缩<sup>[13]</sup>,本文分析了该装置在不同实验条件下的工作机制,通过调节偏振控制器,实验获得 10 GHz 的脉宽可调平顶光脉冲输出,脉宽调节范围在 12~19 ps 之间.调节激光腔中的宽带滤波器,可在不同波长处获得平顶光脉冲,且输出平顶光脉冲性能稳定,边模抑制比(Side Mode Supress Ratio, SMSR)为 65 dB,定时抖动(timing jitter) 145 fs,可作为时钟信号源,用于不同速率及不同波长信号的解复用.

## 1 实验装置及工作原理

图 1 为基于主动锁模联合非线性偏振旋转的脉宽可调平顶光脉冲整形装置.其中虚线左边是一个常见的主动锁模装置,包括一个 10 GHz 的 M-Z 强度调制器(Modulator, MOD),偏置电压为 -3.4 V,正弦射频驱动功率为 2 dBm.由于调制器是偏振敏感元件,其前端放置了一个偏振控制器(Polarization Controllers, PC)PC<sub>3</sub>,用来优化进入调制器的光脉冲的偏振态.实验中采用了一个 3 dB 带宽为 1.5 nm 的带通滤波器

(Band Pass Filter, BPF),用来抑制主动锁模激光器的高阶纵模噪声.装置中高功率 EDFA 的最大输出功率为 340 mW,实验中把功率设置在 120 mW 左右;一个光纤延迟线(Optical Delay Line, ODL)用来细微地改变激光腔的长度.

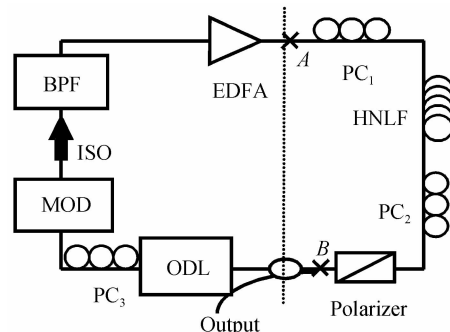


图 1 平顶脉冲整形实验装置

Fig. 1 Experimental setup for the flat-top pulse generation

图 1 右半部是非线性偏振旋转结构,用于光脉冲整形,以获得平顶脉冲.该结构包括两个偏振控制器 PC<sub>1</sub> 和 PC<sub>2</sub>,以及两偏振控制器之间插入的一段 2 m 长的掺 Bi 高非线性光纤(High Nonlinear Fiber, HNLF),该光纤的非线性系数为 1 000 W<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup>,总损耗为 9 dB;该结构还包括一个光纤检偏器(Polarizer).

图 2 为非线性偏振旋转结构的传输原理.光脉冲从 A 点通过 PC<sub>1</sub>,电场强度为  $E$ ,到达略有双折射效应

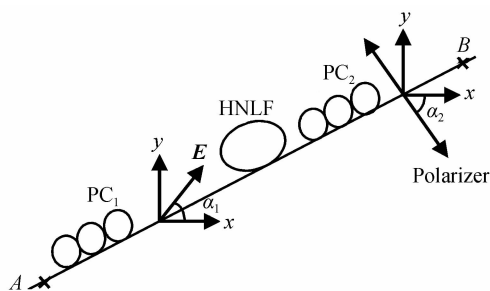


图 2 非线性偏振旋转结构的传输原理

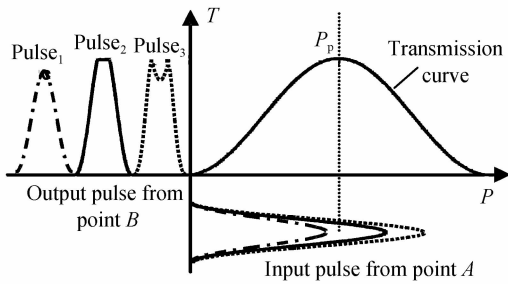
Fig. 2 The transmission principle of NPR

的掺 Bi 高非线性光纤端口,其快轴与慢轴分别用  $x$  轴和  $y$  轴表示,  $E$  矢量与  $x$  轴的夹角为  $\alpha_1$ ,  $x$  轴与检偏器的偏振方向的夹角为  $\alpha_2$ .光脉冲经过整个非线性偏振旋转结构的透过率  $T$  为<sup>[14]</sup>

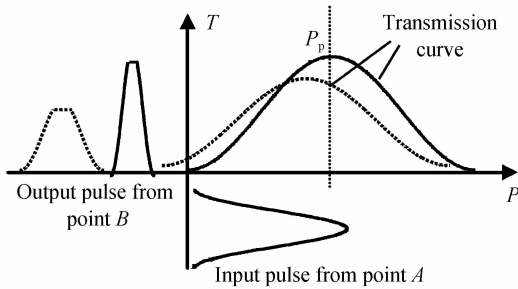
$$T = \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_2 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \cdot$$

$$\sin 2\alpha_2 \cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL}) \quad (1)$$

式中,  $\Delta\varphi_L = (n_x - n_y)\beta L$ ,  $\Delta\varphi_{NL} = -(1/3)\gamma PL \cos \alpha_2$ ,  $L$ 、 $n_x$ 、 $n_y$ 、 $\gamma$ 、 $P$  分别表示非线性光纤的长度,  $x$  轴和  $y$  轴的有效折射率,非线性系数以及输入信号的瞬态功率.  $\beta = 2\pi/\lambda$ ,  $\Delta\varphi_L$  可以看成常量.这样透射率  $T$  随瞬态输入功率变化的透射率曲线如图 3(a).



(a) Principle of FTP shaping



(b) Principle of FTP shaping with pulsewidth tunable by tuning PCs

图3 脉宽可调平顶脉冲整形原理

Fig. 3 Principle of FTP shaping with pulsewidth tunable

在图1中A点的主动锁模光脉冲经过非线性偏振旋转装置将经历脉冲整形,图3(a)为平顶光脉冲整形原理.当A点光脉冲的峰值功率小于透过率曲线上最大透过率光功率 $P_p$ 时,脉冲整形表现为脉冲压缩,即:脉冲瞬态功率越高的部分透过率越高,瞬态功率越低的部分透过率越低,结果从非线性偏振旋转装置输出的脉冲将变窄,如图3(a)中B点输出的平顶光脉冲pulse1所示.适当增加点A脉冲的峰值功率,使其增大

到大于最高透过率功率 $P_p$ 时,这时脉冲整形分为两部分:脉冲瞬态功率超过 $P_p$ 的部分,功率越高,透过率越低,因而当脉冲峰值功率适当的时候,可以形成平顶结构;脉冲瞬态功率小于 $P_p$ 的部分,整形的结果类似于脉冲压缩,将使脉冲前后沿变陡(图3(a) pulse<sub>2</sub>).当脉冲峰值功率继续增大,这时峰值功率过大处出现一个谷(图3(a) pulse<sub>3</sub>).

调节两个偏振控制器的偏转角,其实质是调节公式(1)中的 $\alpha_1$ 或 $\alpha_2$ 值,从而将改变透过率曲线在坐标轴上的位置,图3(b)中的两条透过率曲线分别对应不同的 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 值.这样,对于从A点进入的同一列锁模光脉冲,由于透过率曲线的不同将得到不同的整形输出脉冲,图3(b)显示了B点输出的对应于两条透过率曲线的平顶光脉冲(实线和虚线表示的两个平顶光脉冲),它们具有不同的整形输出形状及脉宽.

## 2 实验结果及讨论

图4(a)~(c)为实验测得的不同偏振态下输出的平顶光脉冲,脉宽分别为12.3、15.6和19.1 ps.实验中采用光示波器测量脉宽,该光示波器的上升沿和下降沿仅为100 fs,因而可以忽略测量仪器的响应速度造成的测量脉冲展宽现象.图4(d)~(f)为图4(a)~(c)对应的光谱.光脉冲的上升沿和下降沿越陡,对降低解复用误码率越有帮助.为了衡量输出光脉冲的陡度,测量了图4(a)~(c)光脉冲上升沿90%和10%处的光脉冲宽度比,分别为48%、45%和38%.作为比较,测量了常用的无啁啾高斯型光脉冲90%~10%上

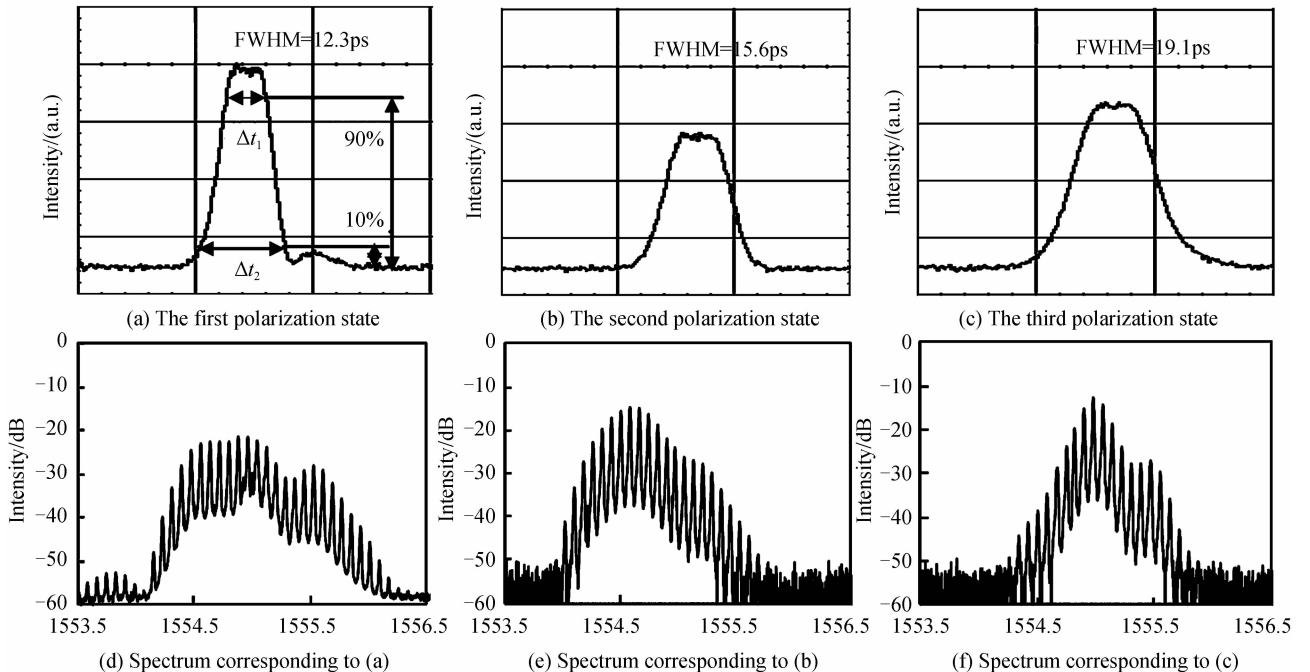


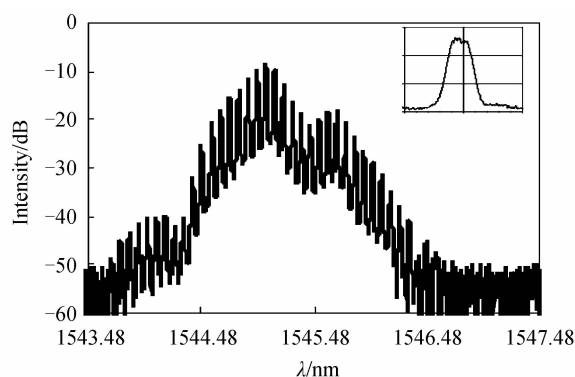
图4 不同偏振态下输出的平顶光脉冲波形及为对应的光谱

Fig. 4 Output flat-top pulse train at different polarization state and the corresponding spectrum

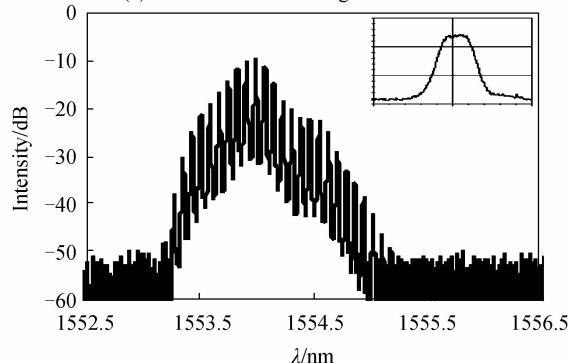
升沿处的脉宽比,为 21%,说明测得的平顶光脉冲具有比高斯光脉冲高得多的陡度,这是非线性偏振旋转装置对光脉冲两侧的上升沿和下降沿压缩的结果.通过改变  $PC_1$  和  $PC_2$ ,调节加在电光调制器上射频驱动电流及偏置电流大小,适当移动非线性偏振旋转结构的透过率曲线,可以提高平顶脉冲的陡度.从图 4(d)~(f)可得三个不同光脉冲的光谱 3 dB 带宽分别为 0.629, 0.396, 0.209 nm.对于平顶脉冲,比较了平顶脉冲及其傅里叶变换光谱的时间带宽积和实际测量脉冲和光谱的时间带宽积,分别为 0.2 和 0.499.说明所获得的平顶光脉冲具有很大的啁啾,这种啁啾来自高非线性光纤中的非线性效应.虽然所获得的平顶光脉冲具有很大的啁啾,还是可以用于交叉增益调制的解复用中.

调节带通滤波器,然后再调节偏振控制器  $PC_1$  和  $PC_2$ ,可在不同波长处获得平顶脉冲.图 5(a)、(b)和(c)分别为波长 1545.05 nm、1553.97 nm 和 1563.79 nm 处获得平顶脉冲的光谱及对应的平顶脉冲(见光谱中的插图).表明在不同波长处均可获得平顶脉冲.

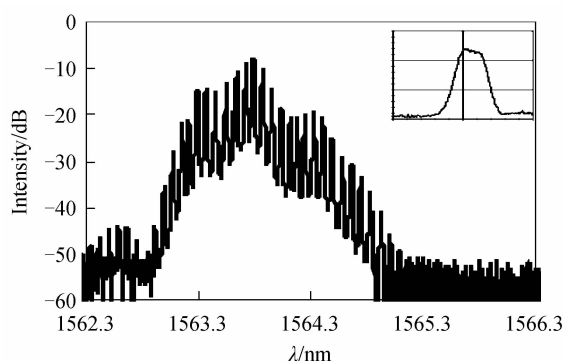
实验同时测量了输出光脉冲的稳定性,用频谱分析仪测量得到输出平顶光脉冲的边模抑制比为 65 dB,如图 6(a)所示,表明激光腔中的超模噪音被很好地抑制了.其原因是在激光腔中的非线性偏振旋转效应充当了“高通滤波器”的作用,最终超模被很好地抑制了.图 6(b)显示了频谱分析仪测量到的相位噪音,测得的相位噪音为 0.009 1,对应定时抖动 145 fs,表明测得的



(a) At the center wavelength of 1545.05 nm

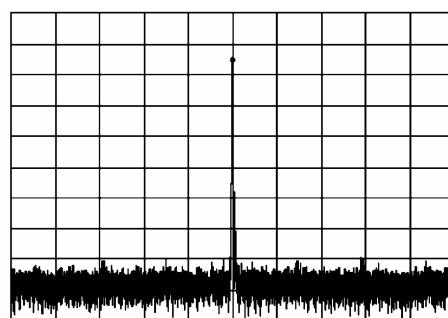


(b) At the center wavelength of 1553.97 nm

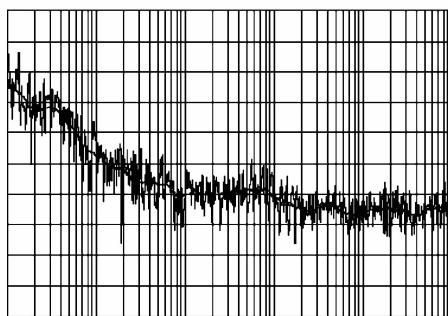


(c) At the center wavelength of 1563.79 nm

图 5 不同中心波长的平顶光脉冲光谱和对应波形(插图)  
Fig. 5 The spectrum and waveform (inset) of generated flat top pulses at different wavelength



(a) SMSR



(b) Phase noise

图 6 平顶光脉冲的边模抑制比和相位噪音

Fig. 6 Measured SMSR and phase noise for the output flat-top pulses

光脉冲具有非常好的定时抖动特性,可用作解复用中的光脉冲时钟源.

### 3 结论

本文提出了基于主动锁模联合非线性偏振旋转光纤激光器的脉宽可调的平顶光脉冲整形技术.该光纤激光器分为两部分:一部分为 10 GHz 的主动锁模光脉冲生成部分;另一部分为用于平顶光脉冲整形的非线性偏振旋转结构.通过简单地调节偏振控制器,可获得 12~19 ps 脉冲宽度范围内的平顶脉冲输出;改变滤波器的中心波长,可在不同波长处获得平顶光脉冲.通过改变激光器的参量,如非线性光纤长度等,可望获得更窄的光脉冲输出.实验同时测量了光脉冲的稳定性,边

模抑制比为 65 dB, 定时抖动为 145 fs. 所获得的脉宽可调平顶光脉冲可用作高速光通信中的解复用的时钟源.

#### 参考文献

- [1] PETROPOULOS P, IBSEN M, ELLIS A D, *et al.* Rectangular pulse generation based on pulse reshaping using a superstructured fiber Bragg grating [J]. *Lightwave Technology*, 2001, **19**(5): 746-752.
- [2] OXENLOWE L K, PARAMIGIANI F, FRANK A, *et al.* 60 Gb/s retiming using rectangular pulses generated using a superstructured fibre Bragg grating[C]. OECC/IOOC, 2007, **13B**: 3-4.
- [3] JIANG Zhi, HUANG Chen-bin, DANIEL E, *et al.* Spectral line-by-line pulse shaping for optical arbitrary pulse-train generation[J]. *The Optical Society of America B*, 2007, **34**(9): 2124-2128.
- [4] JIANG Zhi, DANIEL E, LEAIRD, *et al.* Spectral line-by-line pulse shaping on an optical frequency comb generator [J]. *IEEE Journal of Quantum*, 2007, **43**(12): 1163-1274.
- [5] MIAO Hou-xun, MIRKIN A M L. Wideband deterministic all-order polarization-mode dispersion generation via pulse shaping[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2008, **20**(2): 159-161.
- [6] JIANG Z, HUANG C, LEAIRD D E, *et al.* Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 463-467.
- [7] LEE J H, TEH P C, PETROPOULOS P, *et al.* All-optical modulation and demultiplexing systems with significant timing jitter tolerance through incorporation of pulse-shaping fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2002, **14**(2): 203-205.
- [8] PARMIGIANI F, PETROPOULOS P, IBSEN M, *et al.* All-optical pulse reshaping and retiming systems incorporating pulse shaping fiber Bragg grating[J]. *Lightwave Technology*, 2006, **24**(1): 357-364.
- [9] KULISHOV M, AZANA J. Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(20): 2700-2702.
- [10] PARKL Y, KULISHOV M, SLAVIK R, *et al.* Picosecond and sub-picosecond flat-top pulse generation using uniform long-period fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26): 12670-12678.
- [11] BLOW K J, DORAN N J, NAYAR B K, *et al.* Two-wavelength operation of the nonlinear fiber loop mirror[J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(4): 248-250.
- [12] JIANG Yun-tao, LUO Hang, YUAN Pen, *et al.* An All-optical Pulse Shaper Based On Nonlinear Optical Loop Mirror [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2005, **32**(9): 1239-1242. 蒋运涛, 罗航, 袁鹏, 等. 基于光纤环形镜的全光脉冲整形器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1239-1242.
- [13] CARRUTHERS T F, DULING I N. Active-passive modelocking in a single polarization erbium fiber laser[J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(13): 1051-1053.
- [14] LI Z, LOU C, CHAN K T, *et al.* Theoretical and experimental study of pulse-amplitude-equalization in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2001, **37**(1): 33-36.