

基于啁啾光纤光栅的被动锁模掺 Yb³⁺ 激光器

王兆坤^{1,2} 杜松涛¹ 王子薇^{1,2} 何 晶^{1,2} 周 军¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于啁啾光纤布拉格光栅(C-FBG)与半导体可饱和吸收镜(SESAM)相结合实现了光纤掺 Yb³⁺ 线型锁模激光器。采用 976 nm 半导体激光器,以高掺杂浓度的掺 Yb³⁺ 光纤作为增益介质,以 SESAM 作一端的反射镜,以 C-FBG 引入大的负色散,并作为另一端反射镜,最终获得了稳定皮秒脉冲序列的输出。其中心波长为 1045 nm,平均功率为 12 mW,基频重复频率为 17.07 MHz,脉宽约为 3 ps。详细讨论了高阶锁模光脉冲的演化方式。该锁模光纤激光器可以完全自启动,可以长时间稳定工作,有望成为高功率超短脉冲激光器的种子源。

关键词 激光器; 光纤激光器; 被动锁模; 啁啾光纤布拉格光栅; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0802002

Passive Mode-Locked Yb³⁺-Doped Laser Based on Chirped Fiber Bragg Grating

Wang Zhaokun^{1,2} Du Songtao¹ Wang Ziwei^{1,2} He Jing^{1,2} Zhou Jun¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The passively mode-locked all fiber Yb³⁺-doped linear laser based on the chirped fiber Bragg grating (C-FBG) combined with a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is achieved. High doping concentration Yb³⁺-doped fiber is used as the gain medium, which is pumped by a 976 nm diode laser, with a SESAM as one end of the reflector. A C-FBG introduces a large anomalous dispersion, and operates as the other end of the reflector. Finally, a stable picosecond pulse sequence output is achieved with pulse duration of 3 ps at repetition rate of 17.07 MHz. The maximum average power is 12 mW with the center wavelength of 1045 nm. The evolution of higher-order mode-locked optical pulse is discussed. The mode-locked fiber laser can be self-starting and has a long-time stability, and is expected to become seed sources for high-power ultrashort pulse laser.

Key words lasers; fiber laser; passively mode-locked; chirped fiber Bragg grating; semiconductor saturable absorber mirror

OCIS codes 140.3538; 140.3510; 140.3570; 140.4050

1 引 言

锁模光纤激光器^[1-4]由于稳定性高,结构简单,可以产生短脉冲或超短脉冲,因此在光通信系统、微

加工、及光探测系统以及生物光学应用等领域得到广泛应用。其中,工作在 1 μm 波段的锁模光纤激光器由于掺 Yb³⁺ 光纤具有宽的发射带宽、大的饱和

收稿日期: 2014-01-03; 收到修改稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61308024)、上海市自然科学基金(11ZR1441400)、上海市青年科技启明星计划(12QH401100)

作者简介: 王兆坤(1989—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲光纤锁模技术方面的研究。

E-mail: siomwzhk@163.com

导师简介: 周 军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

通量以及很高的光光转化效率等特点,从而可以产生宽度短、脉冲能量高的超短脉冲,得到广泛的关注,成为新的研究热点。

在大部分的锁模激光器中,为了平衡克尔非线性效应引起的自相位调制(SPM)^[5],都需要一定程度的色散管理^[6],即通过在腔内使用色散补偿元件引入反常群速度色散(GVD)。一种方法是采用光栅对进行色散补偿^[7-8],这也是最普遍的一种方法。然而,这种光栅对通常采用空间结构,无疑增加了系统的复杂性及不稳定性。光栅对的另一个缺点是空间上两个光栅之间的光束将会发散,其横截面类似于一个拉长的椭圆,导致光束发生畸变,而且光栅对的损耗会很大。另一种产生反常 GVD 的方法是采用透镜对折射,但是因为石英的色散很小,通常需要棱镜对间距比光栅对间距大得多^[9]。在一些实验中采用光子晶体光纤(PCF)进行色散管理^[10]。这种全光纤的结构对环境不敏感,比较稳定。但是这种色散控制的方法需要很长的 PCF 来提供负色散,这就限制了激光器的最小腔长,而且相对于普通的石英光纤,PCF 的处理更复杂一些。

在锁模激光器中,另一种非常有效地控制色散的方式是使用啁啾光纤布拉格光栅(C-FBG)^[11-14]。与其他的色散管理方法相比,加入 C-FBG 的方法具有明显的优势,C-FBG 制造工艺成熟,可以直接与有源光纤熔接,结构稳定。此外,当 C-FBG 作为线型腔一端的反射镜时,可以起到光谱滤波器的作用。Fermann 等^[15]最先报道了使用 C-FBG 进行色散管理的掺钕锁模光纤激光器,最终获得了单脉冲能量为 1 nJ、重复频率为 27 MHz、脉宽为 3 ps,中心波长为 1550~1562 nm 可调的激光输出。中国科学院上海光学精密机械研究所张磊等^[12-13]通过将 C-FBG 应用到非线性偏振旋转(NPR)结构中,研究了不同孤子的形成机制。在文献^[14]中,将 C-FBG 与

半导体可饱和吸收镜(SESAM)相结合得到的掺 Yb³⁺ 锁模光纤激光器,最终获得孤子脉冲。在 2 μm 波段的锁模,Gumenyuk 等^[16]等通过将 C-FBG 引入正色散量,最终获得了耗散孤子。

在 1 μm 波段采用 C-FBG 来控制色散并与 SESAM 相结合实现被动锁模的研究相对较少。本实验采用 SESAM 作为锁模元件,并作为一端的反射镜;通过 C-FBG 引入大的负色散,并作为另一端的反射镜,增益介质采用高掺杂的单模掺 Yb³⁺ 光纤。采用更为简单的结构,仅使用偏振控制器(PC)控制腔内的偏振态。最终实现了稳定的锁模皮秒脉冲的输出,最大平均功率约为 12 mW,脉宽约为 3 ps,基频光的重复频率约为 17.07 MHz,并讨论了高阶锁模光脉冲的演化方式。

2 实验装置及原理

图 1 为基于 C-FBG 实现被动锁模的实验装置图,采用了线型腔的结构设计。采用带尾纤输出的中心波长为 976 nm 的半导体激光器(LD)作为抽运源,最大输出功率为 600 mW。长 90 cm 的高浓度掺杂单模掺 Yb³⁺ 光纤作为增益介质,在 976 nm 处的吸收系数为 250 dB/m。谐振腔一端以 SESAM 作为反射镜。本文所采用 SESAM(SAM-1064-15-30ps-4.0)为 BATOP 公司生产,其调制深度为 9%,恢复时间为 30 ps,饱和通量为 70 μJ/cm²。输出端采用耦合比为 10:90 的输出耦合器,将其中 10%的一端作为输出;90%的一端熔接一段长度为 6.4 mm 的 C-FBG,其啁啾系数为 13 nm/cm,色散为 ±2.2 ps²(根据啁啾光栅在腔中的方向不同而不同),中心波长为 1050.85 nm,3 dB 带宽约为 14 nm,反射率大于 98%。腔内增加偏振控制器实现腔内偏振态的控制。为了避免光纤端面的菲涅耳反射,光纤端面均以 8°角切割。整个线性激光腔的总长度约为 6 m。

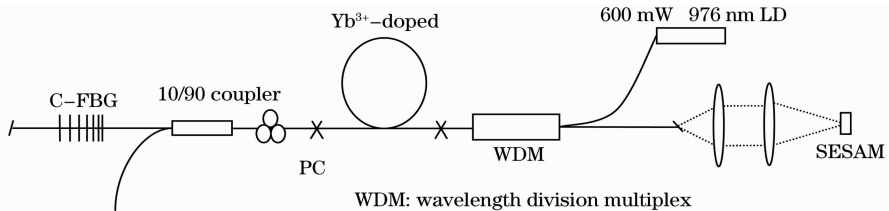


图 1 基于 C-FBG 的被动锁模激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of passive mode-locking laser based on C-FBG

3 实验结果与分析

随着抽运功率的增加,谐振腔工作在三种不同

的状态。当抽运功率约为 48 mW,谐振腔工作于连续状态,输出中心波长为 1044.7 nm 的连续光

(CW);抽运功率增加至 140 mW 时,谐振腔工作于调 Q 锁模状态,输出光强起伏的脉冲序列;继续增大功率至 210 mW,并适当调节 PC 的位置,此时达到该激光器锁模自启动的阈值,便可获得稳定的激光输出。随着抽运功率的进一步提高,激光会产生双脉冲或者多脉冲的输出,但是脉冲分裂有不同的形成方式。图 2 给出了谐振腔输出激光功率随抽运功率变化的曲线,从图中可以看出,虽然谐振腔工作在不同的状态,但输出激光功率随抽运功率呈线性增长。与文献[14]中在达到锁模阈值时会出现功率上升的现象有所不同,这是由于此时功率变化比较小,考虑到功率计的抖动,没有对此过程功率的变化进行详细的讨论。

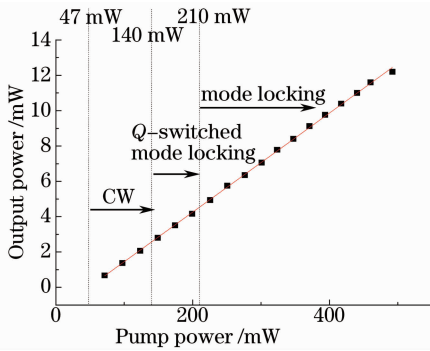


图 2 激光器平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power versus pump power

采用 YOKOGAWA AQ6370B 光谱仪采集(分辨率为 0.02 nm),测量了谐振腔不同工作状态(不同抽运功率下)时的输出光谱,如图 3 所示,当谐振腔处于连续状态时,产生光谱如图 3 中虚线所示,光谱为中心波长为 1044.7 nm 的窄线宽(线宽为 1.3 nm)光谱。激光的中心波长处于 C-FBG 的反射光谱曲线的短波端的边缘主要是由于 Yb³⁺ 光谱增益特性决定的。由图 4 中可以看出,在该 C-FBG 的反射带(1043~1057 nm)内,Yb³⁺ 离子在短波处

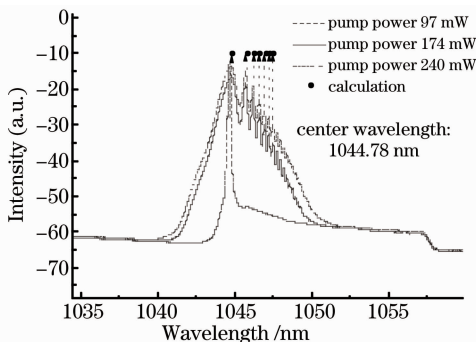


图 3 不同抽运功率的输出光谱

Fig. 3 Optical spectra at different pump powers

的增益系数更高。因此,产生的激光中心波长约为 1045 nm。图 3 中实线和点划线分别为调 Q 锁模、稳定锁模输出时的光谱图。可以发现在调 Q 锁模、锁模状态下,光谱会产生明显分离的频谱边带。但是由于产生的激光的中心波长正好处于 C-FBG 的反射光谱曲线的短波端的边缘,从而,由 C-FBG 引起的光谱滤波的效应最终导致了非对称的频谱边带的现象。

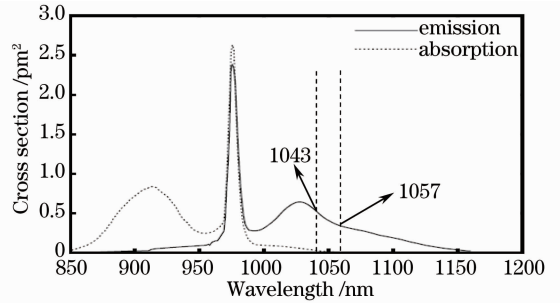


图 4 掺镱石英光纤的吸收谱与发射谱

Fig. 4 Absorption spectra and emission spectra of Yb³⁺-doped

频谱边带的产生是由于在连续循环的过程中,对于某些离散的频率,孤子的相位能够匹配,能量便会发生累积,这最终导致了狭窄的频谱边带的产生^[17]。随着抽运功率的提高,3 dB 带宽会逐渐变大,但边带之间的间距并没有明显的变化。边带频率与中心载波频率满足

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{T_0^2} - \frac{2\pi}{D}m}, \quad (1)$$

式中 σ_m 是边带频率与中心载波频率的频率差(单位为 rad/s), T_0 是脉冲宽度, D 是整个腔的色散($D = D_{\text{fiber}} + D_{\text{C-FBG}}$), m 为边带相对于中心载波频率的次序。实验中最终测得脉冲宽度约为 3 ps, $D_{\text{C-FBG}}$ 为 -2.2 ps^2 , 单模光纤在 1 μm 波段的色散系数约为 $-50 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 单模光纤长度约为 6 m, D_{fiber} 为 0.18 ps^2 , 腔内的总色散为 -2.02 ps^2 , 代入(1)式,理论计算得到的边带的波长如图 3 中实点所示,实验值与理论值能够很好得吻合,误差范围在 0.1 nm 以内。

采用 LeCroy Wavesurfer 104MXs 示波器(带宽 600 MHz)、Thorlabs DET02AFC 光电探测器(带宽 1.2 GHz),测量了谐振腔输出脉冲的时域特性。当谐振腔工作在稳定锁模状态时,输出激光脉冲重复频率为 17.07 MHz。该激光器的腔长约为 6 m,经理论计算的重复频率约为 17.8 MHz,与实验值相符。由于激光器为负色散激光器,输出的脉

冲为双曲正割的传统孤子脉冲,这种孤子与耗散孤子相比,无明显的啁啾特性,而且脉冲宽度相对较小。实验中,采用 Pulse Check 自相关仪(分辨率为 6 fs)测得锁模脉冲的自相关曲线,如图 5 所示。测得高斯拟合后的半峰全宽(FWHM)为 4.36 ps,即实际的 FWHM 为 3.09 ps。当达到锁模阈值之后,改变抽运功率,脉冲宽度并没有明显的变化。

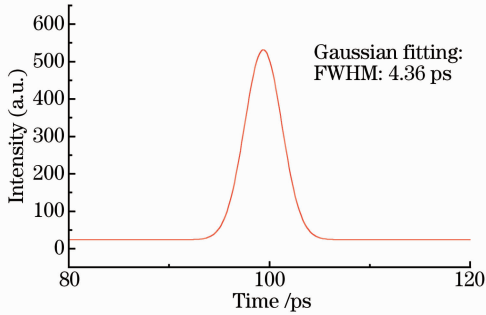


图 5 锁模脉冲的自相关信号

Fig. 5 Autocorrelation signal of mode locking pulse

当谐振腔工作于锁模状态后,继续增大抽运功率,激光器的输出光脉冲会发生脉冲分裂,成为几乎等幅度的两个光脉冲,重复频率约为 31.96 MHz;

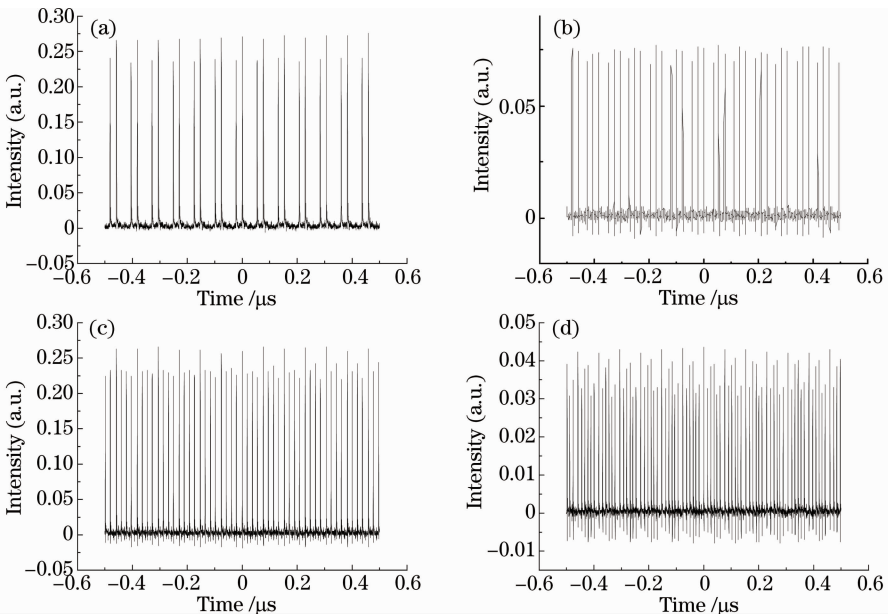


图 6 不同抽运功率下的脉冲序列图。(a) 双脉冲序列;(b) 三脉冲序列;(c) 四脉冲序列;(d) 六脉冲序列

Fig. 6 Pulse trains at different pump powers. (a) Pulse train of two pulses; (b) pulse train of three pulses; (c) pulse train of four pulses; (d) pulse train of six pulses

当达到高抽运功率时,谐振腔输出稳定的多脉冲束状态。如图 7 所示,在重复频率为 17.07 MHz 的基频光脉冲之间,出现了混乱的高频谐波分量,其幅值约为基频脉冲幅值的 2/3,重复频率为 221 MHz。

随着抽运功率的进一步增加,会依次出现三个脉冲、四个脉冲以及多个脉冲等。图 6 给出了两个脉冲、三个脉冲、四个脉冲、六个脉冲的序列图,其对应的重复频率分别为 31.96、39.1、52.6、80.9 MHz。这与文献[18]报道的结果有所不同,文献[18]只观测到 2^n ($n=1, 2, 3 \dots$) 次脉冲的分裂。这是由于本文与文献[18]属于不同的多脉冲运转模式。本文的脉冲分裂属于孤子束锁模,孤子束是由多个脉冲组成的脉冲序列,脉冲间距一般超出脉宽几十倍以上,脉冲之间有短暂的相互作用和碰撞过程。文献[18]属于谐波锁模,其多脉冲等间距地分布在谐振腔中,脉冲间距较大而无直接相互作用。本文光脉冲形成的原因主要是当抽运增加到比较高的功率时,首先出现的基频锁模序列脉冲能量比较高,会变得不稳定;由于腔内啁啾光栅引起的负色散,会形成高阶孤子;高阶孤子由于稳定性差,会在腔内发生周期性的分裂,依次形成两个、三个或者多个光脉冲;由于光孤子脉冲间的相互作用力,光脉冲最终会发生分离,分离后的光脉冲在增益介质中相互竞争;最后达到时域间隔均匀分布,分别分裂成两个脉冲、三个脉冲以及多个脉冲等^[17]。

这种在高抽运功率下输出稳定的多脉冲束的现象是由于光脉冲在光纤中传播时会产生横向声场,进而会引起电致伸缩激发,这种激发所引起的长距离的光孤子相互作用最终导致了脉冲的分裂^[18]。

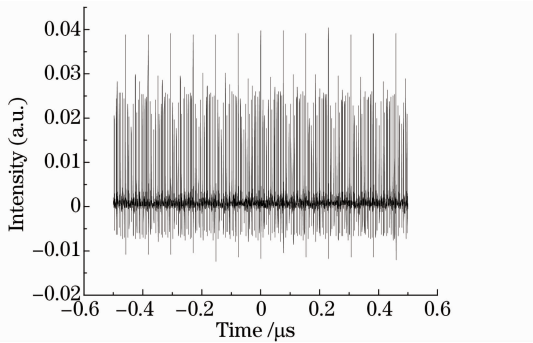


图7 脉冲束锁模光脉冲

Fig.7 Mode locking pulse train of pulse beam

4 结 论

报道了基于 C-FBG 的光纤被动锁模掺 Yb³⁺ 超短脉冲激光器。整个激光器采用线型腔结构,以 SESAM 作为锁模元件和一端的反射镜,采用 C-FBG 引入大的负色散,并作为另一端反射镜。最终获得了中心波长为 1045 nm,最高输出功率为 12 mW,基频重复频率为 17.07 MHz,脉宽为 3 ps 的稳定锁模脉冲序列的输出。通过色散管理,本系统有望能够实现飞秒量级脉冲的输出。并详细讨论了该锁模激光器的光谱特性以及时序特性,对高功率抽运下产生的脉冲分裂进行了分析。激光器具有结构简单、运转稳定的特点,有望成为高功率超短脉冲激光器的种子源。

参 考 文 献

- 1 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- 2 Zhu Pan, Sang Mei, Gao Yang, *et al.*. Wavelength switchable passive mode-locking fiber laser based on single-wall carbon nanotube[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202005.
朱攀, 桑梅, 高杨, 等. 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202005.
- 3 Shi Mingwei, Liu Bowen, Wang Sijia, *et al.*. Generation of giant-chirp laser pulses in a stretched-pulse mode-locked fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202007.
石明威, 刘博文, 王思佳, 等. 输出大啁啾脉冲的展宽脉冲锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202007.
- 4 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0 μm thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602009.
刘江, 徐佳, 王潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.

- 5 G P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 547-553.
G P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 547-553.
- 6 Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Passively mode-locked traditional soliton, dissipative soliton Er-doped fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702003.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 被动锁模的传统孤子、耗散孤子掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702003.
- 7 R A Fisher, P L Kelly, T K Gustafson. Subpicosecond pulse generation using the optical Kerr effect[J]. Appl Phys Lett, 1969, 4(14): 140-143.
- 8 C V Shank, R L Fork, R Yen, *et al.*. Compression of femtosecond of optical pulses[J]. Appl Phys Lett, 1982, 40(9): 761-763.
- 9 S Ghalmi, S Ramachandran, I Ryazansky, *et al.*. On the scalability of adjustable high-order mode fiber dispersion compensators[C]. Optical Fiber Communications Conference, 2003. 719-720.
- 10 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Bowen, *et al.*. High energy femtosecond soliton mode-locking laser based on Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6425-6429.
宋有建, 胡明列, 刘博文, 等. 高能量掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤孤子锁模飞秒激光器[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6425-6429.
- 11 Tan Zhongwei, Ning Tigang, Liu Yan, *et al.*. Application of dispersion compensator based on fiber gratings in ultra long-haul DWDM system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2799-2803.
谭中伟, 宁提纲, 刘艳, 等. 基于啁啾光纤光栅的色散管理[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2799-2803.
- 12 Lei Zhang, A R El-Damak, Yan Feng, *et al.*. Experimental and numerical studies of mode-locked fiber laser with large normal and anomalous dispersion[J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12014-12021.
- 13 L Zhang, Y Feng, X Gu. Wavelength-switchable dissipative soliton fiber laser with a chirped fiber grating stop-band filter[J]. IEEE Photonics J, 2013, 5(2): 1500506.
- 14 O Katz, Y Sintov, Y Nafcha, *et al.*. Passively mode-locked ytterbium fiber laser utilizing chirped-fiber-Bragg-gratings for dispersion control[J]. Opt Commun, 2007, 269(1): 156-165.
- 15 M E Fermann, K Sugden, I Bennion. High-power soliton fiber laser based on pulse width control with chirped fiber Bragg gratings[J]. Opt Lett, 1995, 20(2): 172-174.
- 16 R Gumenyuk, I Vartiainen, H Tuovinen, *et al.*. Dissipative dispersion-managed soliton 2 μm thulium/holmium fiber laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(5): 609-611.
- 17 A B Grudinin, S Gray. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers[J]. J Opt Soc Am B, 1997, 14(1): 144-154.
- 18 Liu Dongfeng, Chen Guofu, Bai Jintao, *et al.*. Generation and amplification of the ultrashort optical pulses in passive harmonic mode-locking Er³⁺-doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(2): 241-246.
刘东峰, 陈国夫, 白晋涛, 等. 被动高阶谐波锁模掺 Er³⁺ 光纤激光超短光脉冲的产生及其放大[J]. 物理学报, 2000, 49(2): 241-246.

栏目编辑:王晓球