

# 可调谐掺 Yb 双包层光纤耗散孤子锁模激光器

张丽强<sup>1</sup> 卓 壮<sup>1</sup> 潘志勇<sup>2</sup> 王云征<sup>1</sup> 王静轩<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100  
<sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 201900)

**摘要** 以双包层掺镱光纤为增益介质, 双折射滤光片为波长选择器件, 搭建了可调谐耗散孤子锁模光纤激光器。通过旋转滤光片, 激光器的输出波长在 1063.9~1091.1 nm 范围内连续可调, 脉冲宽度及光谱带宽的变化范围分别为 13.9~16.8 ps 和 15.8~18 nm。中心波长为 1063.9 nm 时, 激光器输出功率为 212 mW, 单脉冲能量为 8.5 nJ。基于耦合的 Ginzburg-Landau 方程和各器件的琼斯矩阵, 建立了可调谐耗散孤子锁模激光器的数值模型, 对激光器的可调谐性能进行模拟, 模拟结果与实验结果一致。

**关键词** 激光器; 波长调谐; 耗散孤子; 双包层光纤; 锁模

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1202007

## Wavelength Tunable Yb-Doped Double-Clad Dissipative Soliton Fiber Laser

Zhang Liqiang<sup>1</sup> Zhuo Zhuang<sup>1</sup> Pan Zhiyong<sup>2</sup> Wang Yunzheng<sup>1</sup> Wang Jingxuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University,  
Jinan, Shandong 250100, China  
<sup>2</sup> No.23 Research Institute of China Electronic Technology Corporation Group,  
Shanghai 201900, China)

**Abstract** A wavelength tunable, passively mode-locked Yb-doped double-clad fiber laser with a birefringent filter is demonstrated in this paper. By carefully rotating the filter, the central wavelength of the mode-locked fiber laser can be continuously tuned from 1063.9 nm to 1091.1 nm. The pulse duration ranges from 13.9 ps to 16.8 ps, and spectrum width varies between 15.8 nm and 18 nm. The maximum average output power of 212 mW is obtained at the central wavelength of 1063.9 nm. The corresponding pulse energy is 8.5 nJ. A theoretical model is established based on the coupled Ginzburg-Landau equations and Jones matrices. Simulation results agree with the experimental results.

**Key words** lasers; wavelength tunable; dissipative soliton; double-clad fiber; mode-locking

**OCIS codes** 140.3460; 140.3510; 140.3600; 140.3615; 140.4050

## 1 引言

波长可调谐短脉冲光源在生物成像、激光光谱学等领域有广泛应用。被动锁模光纤激光器是获得高质量、短脉冲激光输出的一种有效方式。与固体锁模激光器相比, 可调谐被动锁模光纤激光器具有

结构紧凑、散热效果好<sup>[1]</sup>、波长可调谐范围大以及能够获得高光束质量的激光输出等优点而引起人们广泛关注<sup>[2-3]</sup>。

国内外对可调谐被动锁模光纤激光器有很多报道。1995年, Tamura等<sup>[4]</sup>报道的掺铒光纤激光器

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-07-25

基金项目: 山东大学自主创新基金(2011JC025)

作者简介: 张丽强(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: zhangliqiang05@126.com

导师简介: 卓 壮(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事全固态激光器, 光纤激光器和超快激光技术等方面的研究。

E-mail: zhuozhuang@sdu.edu.cn(通信联系人)

在 1528~1610 nm 范围内可调,典型输出功率为 400  $\mu$ W。2003 年,Okhotnikov 等<sup>[5]</sup>搭建的可调谐被动锁模掺镱光纤激光器重复频率为 30 MHz,平均输出功率为 3 mW。以上报道均为工作在负色散域的传统孤子锁模光纤激光器,由于孤子面积理论的限制,脉冲能量在 0.1 nJ 量级。

近几年,工作在正色散域的耗散孤子锁模光纤激光器引起人们广泛关注<sup>[6-9]</sup>,它通过脉冲展宽来降低峰值功率,从而降低光纤的非线性影响,相比于传统孤子锁模激光器,耗散孤子锁模激光器能输出更高能量的脉冲。在这种光纤激光器中,脉冲的形成是光纤色散、非线性、增益以及光谱滤波效应共同作用的结果。2010 年,Zhang 等<sup>[10]</sup>以石墨烯为锁模器件,搭建的可调谐耗散孤子锁模光纤激光器的单脉冲能量达到 2.3 nJ。Kong 等<sup>[11]</sup>在 2010 年报道了可调谐全正色散锁模光纤激光器,抽运功率为 252 mW 时,输出功率为 26 mW,对应的单脉冲能量为 1.4 nJ。虽然相比于传统的孤子锁模可调谐光纤激光器,耗散孤子锁模激光器的脉冲能量和平均功率有了很大提高,但输出的平均功率仍低于 100 mW。输出功率比较低的一个主要原因是以上激光器均是用单模激光器进行纤芯抽运,抽运功率限制在约 1 W。

单模纤芯的双包层增益光纤在高功率连续激光器中有广泛应用<sup>[12-13]</sup>,它保留了单模光纤的优点,同时能够用高功率多模激光器进行包层抽运,从而输出较高的功率。国内外很多学者开展了以单模纤芯双包层增益光纤为增益介质的锁模光纤激光器的研究<sup>[14-15]</sup>。2009 年,Kieu 等<sup>[14]</sup>采用包层抽运技术,在耗散孤子锁模光纤激光器中获得了 2.2 W 的功率输出,对应的单脉冲能量为 31 nJ。目前未见以单模纤芯的双包层掺 Yb 光纤为增益介质的可调谐耗散孤子锁模光纤激光器的报道。

以单模纤芯双包层掺 Yb 光纤为增益介质,以双折射滤光片为波长选择器件,搭建了可调谐耗散孤子锁模光纤激光器,获得了稳定的耗散孤子锁模脉冲。激光器平均输出功率为 212 mW,对应的单脉冲能量为 8.5 nJ。结合双折射滤光片的透过函数,建立了基于耦合的 Ginzburg-Landau 方程和各器件琼斯矩阵的锁模激光器的数值模型,对可调谐激光器的性能进行了模拟,模拟结果与实验结果一致。

## 2 实验装置

可调谐耗散孤子锁模光纤激光器的实验装置如

图 1 所示。增益介质为长 2 m 的掺 Yb 双包层光纤,芯径为 10  $\mu$ m,纤芯及内包层数值孔径分别为 0.08 和 0.46,其 976 nm 处的吸收系数为 6.5 dB/m。两个  $\lambda/4$  波片(QWP1, QWP2),一个  $\lambda/2$  波片(HWP)及一个偏振分束器(PBS)用来实现非线性偏振旋转。一个偏振相关的高功率隔离器(ISO)用来保证光单向传输。一个厚度为 4.09 mm 的光轴平行于表面的石英晶体片与 PBS 及 ISO 共同组成双折射滤光片。抽运光通过抽运信号合束器耦合到增益光纤,抽运激光器的波长为 975 $\pm$ 3 nm,最大输出功率为 25 W。各器件尾纤的纤芯均与增益光纤芯径一致。所有光纤为正色散,谐振腔总长为 8.1 m,总色散为 0.33 ps<sup>2</sup>。实验中通过 MS9710C 光谱仪记录光谱形状,通过 TDS7104 示波器监测脉冲的时域形状,用 FR-103XL 自相关仪测量脉冲的宽度。

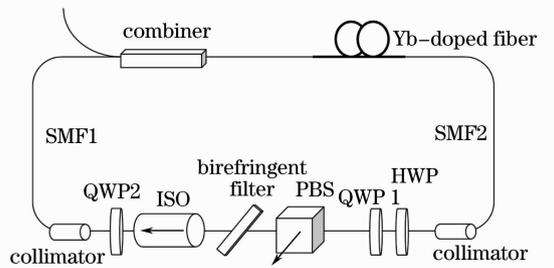


图 1 可调谐锁模光纤激光器实验装置图  
Fig. 1 Experimental setup of the tunable mode-locked fiber laser

通过旋转双折射滤光片实现波长调谐。滤光片的透射函数为

$$T = 1 - \sin^2(2\phi)\sin^2(\delta/2), \quad (1)$$

式中  $\phi$  为入射面与寻常光电位移矢量之间的夹角,  $\delta = \frac{2\pi d(n_o - n_e)\sin^2\gamma}{\lambda \sin\theta}$  为滤光片引入的相位延迟,  $n_o - n_e$  为寻常光与非寻常光之间的折射率差,  $d$  为滤光片的厚度,  $\gamma$  为内部波矢与光轴的夹角,  $\theta$  为入射角,即布儒斯特角。定义入射面与滤光片光轴之间的夹角  $A$  为调谐角,则

$$\cos\gamma = \cos A \cos\theta, \quad (2)$$

$$\sin\phi = \text{ctg}\gamma \tan\theta. \quad (3)$$

图 2(a)为调谐角为 42.7°时根据(1)式画出的滤光片的透射曲线,透射曲线为正弦形,带宽约 15 nm,在 1030~1105 nm 范围内有 3 个透射峰。如图 2(b)所示,当调谐角在 42°到 47°变化时,一个峰值透射波长在 1062 nm 到 1092 nm 之间可调。

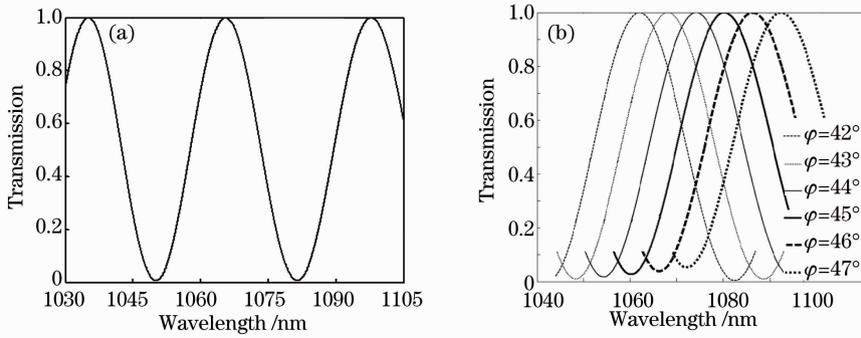


图 2 (a)调谐角为 42.7°和(b)不同调谐角时的滤光片透过曲线

Fig.2 Filter transmission curves at (a) tuning angle of 42.7°and (b) different tuning angles

### 3 实验结果

抽运功率为 3.26 W 时,调节波片可以得到锁模脉冲输出。当抽运功率增加到 3.77 W 时,优化波片的位置,得到稳定的锁模脉冲。激光器的锁模阈值较高,主要原因有两方面,一是抽运激光器的工作波长与增益光纤的峰值吸收波长不匹配;二是自由空间部分的损耗较大。图 3 为抽运功率为 4.28W 时激光器的输出特性,其中图 3(a)为示波器记录的脉冲串的时域波形图,脉冲重复频率为 25.2 MHz,与脉冲在腔内

循环一周的时间一致。图 3(b)为光谱仪记录的脉冲的光谱图,中心波长为 1067.6 nm,3 dB 带宽为 18 nm。光谱具有陡峭的边缘,这是耗散孤子锁模的典型特征。光谱的非对称性是由于增益光纤在 1067.6 nm 附近的增益不对称引起的。图 3(c)为用自相关仪测得的脉冲的自相关曲线,用双曲正割函数拟合,脉冲宽度为 14.6 ps。此时激光器输出功率为 200 mW,对应的单脉冲能量为 7.9 nJ。

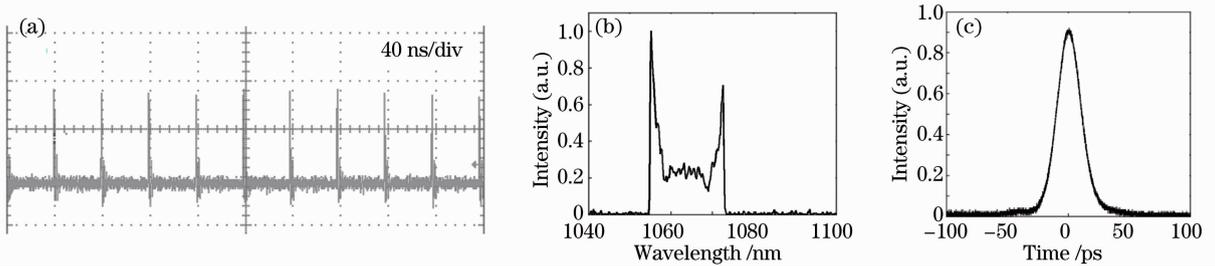


图 3 锁模光纤激光器的输出特性。(a) 时域波形图;(b) 光谱;(c) 自相关曲线

Fig.3 Characteristics of mode-locked fiber laser. (a) Oscilloscope trace; (b) optical spectrum; (c) autocorrelation trace

图 4 为抽运功率为 4.28 W 时的调谐结果。图 4(a)是当双折射滤光片的调谐角从 42°到 47°变化时输出光谱的变化,中心波长在 1063.9 ~

1091.1 nm 范围内连续可调,这与图 2 中计算的滤光片的峰值透射波长一致。输出脉冲中心波长改变时,激光器能一直保持在锁模状态,不需重新调节波

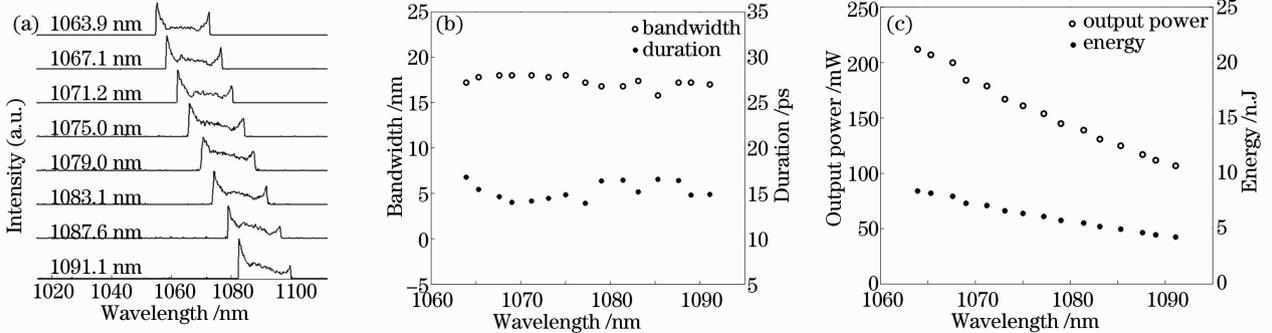


图 4 锁模激光器的调谐性能。(a) 输出光谱;(b) 光谱带宽和脉冲宽度;(c) 平均输出功率和单脉冲能量

Fig.4 Characteristics of wavelength tunable passively mode-locked fiber laser. (a) Output spectra; (b) spectral bandwidth and pulse duration; (c) average output power and pulse energy

片角度。图 4(b), (c) 给出了光谱带宽, 脉冲宽度, 平均输出功率及单脉冲能量随波长的变化情况。脉宽的变化范围为 13.9~16.8 ps, 谱宽的变化范围为 15.8~18 nm。中心波长为 1063.9 nm 时, 得到的最大输出功率为 212 mW, 对应的脉冲能量为 8.5 nJ。脉冲能量为文献[11]报道的相同结构的纤芯抽运的可调谐锁模激光器的 6 倍, 平均功率为其 8 倍。中心波长在 1063.9~1091.1 nm 范围内变化时, 波长越长, 增益光纤的增益越小, 因此, 输出功率随着波长的增加而减小。

当调谐角为 42.7° 时, 滤光片在 1030~1105 nm

$$\frac{\partial A_x}{\partial Z} + \delta \frac{\partial A_x}{\partial T} - i \frac{\Delta\beta}{2} A_x + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial T^2} = i\gamma \left( |A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right) A_x + \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 + \frac{g}{2} A_x + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 A_x}{\partial T^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial Z} - \delta \frac{\partial A_y}{\partial T} + i \frac{\Delta\beta}{2} A_y + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial T^2} = i\gamma \left( |A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right) A_y + \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 + \frac{g}{2} A_y + \frac{g}{2\Omega_g} \frac{\partial^2 A_y}{\partial T^2}, \quad (5)$$

其中  $A_x$  和  $A_y$  为沿光纤两个主轴方向偏振的电场的慢变振幅包络。 $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y} = 2\pi/L_B$  与光纤的模式双折射有关,  $L_B$  为偏振拍长,  $\delta = (\beta_{1x} - \beta_{1y})/2$  为两个偏振分量之间群速度之间的偏差。 $g = \frac{g_0}{1 + \int (|A_x|^2 + |A_y|^2) dt/E_s}$  为增益光纤的增益系数,  $\Omega_g$ 、 $E_s$  和  $g_0$  分别为增益带宽、饱和能量和小信号增益系数。

波片的作用由它们的琼斯矩阵来描述。光纤的  $x$  轴与 QWP1, QWP2 及 HWP 的光轴之间的夹角分别为  $\theta_{QWP1}$ 、 $\theta_{QWP2}$  和  $\theta_{HWP}$ 。双折射滤光片的作用由(1)式来表示。

模拟中用到的参数如下:  $\beta_2 = 0.0404 \text{ ps}^2/\text{m}$ ,  $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , 增益带宽  $\Omega_g = 100 \text{ nm}$ , 饱和能量  $E_s = 1 \text{ nJ}$ , 拍长  $L_B = 0.25 \text{ m}$ 。SMF1, SMF2 及增益光纤的长度分别为 4、1、2 m, 滤光片的厚度取 4.09 mm。模拟中假设  $\beta_{1x} = \beta_{1y}$ , 即  $\delta = 0$ 。

初始信号为白噪声, 通过合理设置小信号增益系数和波片角度, 在很宽的参数范围内均可得到稳定的耗散孤子脉冲。图 5 为  $\theta_{QWP1}$ 、 $\theta_{QWP2}$  及  $\theta_{HWP}$  分别为 44°、85° 和 75° 时仿真得到的锁模脉冲的时域演化图, 每隔 40 圈记录一次脉冲时域形状。得到的脉冲宽度为 12.1 ps, 光谱宽度为 16.9 nm, 接近实验得到的结果。

当滤光片的调谐角在 42° 到 47° 变化时, 调整模拟中用到的波片角度等参数, 可得到 1032.1~1062.2 nm 与 1061.9~1094 nm 两个范围的可调谐

范围内有 3 个透射峰(图 2), 因此当调谐角从 42° 到 47° 变化时, 改变波片角度, 可以得到两个不同的调谐范围, 分别为 1031.5~1063.5 nm 和 1062~1094.6 nm。实验测得的两个调谐范围为 1039.8~1064 nm 和 1063.9~1091.1 nm。因此, 激光器的实际调谐范围为 1039.8~1091.1 nm。

#### 4 数值模拟

脉冲在光纤中的传输由耦合的 Ginzburg-Landau 方程来描述。

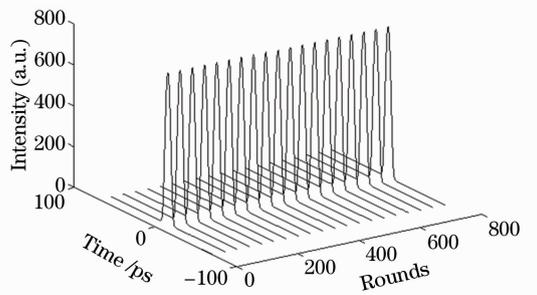


图 5 仿真得到的锁模脉冲的时域演化

Fig. 5 Calculated pulse evolution

输出。图 6 为输出脉冲的中心波长在 1061.9~1094 nm 之间可调谐时的结果, 数值模拟的结果与实验结果一致。

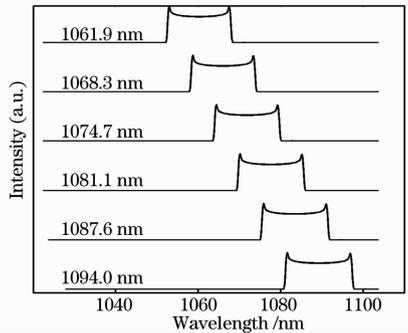


图 6 仿真得到的可调谐输出光谱

Fig. 6 Calculated tunable spectra

#### 5 结 论

报道了一种基于非线性偏振旋转的可调谐掺 Yb 双包层光纤耗散孤子锁模激光器, 通过旋转双折射滤

光片,激光器的输出波长在 1063.9~1091.1 nm 范围内连续可调。中心波长为 1063.9 nm 时,激光器输出功率为 212 mW,单脉冲能量为 8.5 nJ。与纤芯抽运的可调谐光纤激光器相比,输出功率及脉冲能量有了很大提高。通过优化激光器的设计及提高抽运功率,输出功率及脉冲能量有望进一步提高。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High-pulse-energy passively mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.
- 2 S Yamashita, M Asano. Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning[J]. Opt Express, 2006, 14(20): 9299-9306.
- 3 X Y He, Z B Liu, D N Wang. Wavelength-tunable, passively mode-locked fiber laser based on graphene and chirped fiber Bragg grating[J]. Opt Lett, 2012, 37(12): 2394-2396.
- 4 K Tamura, Y Kimura, M Nakazawa. Femtosecond pulse generation over 82 nm wavelength span from passively mode locked erbium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1995, 31(13): 1062-1063.
- 5 O G Okhotnikov, L Gomes, N Xiang, *et al.*. Mode-locked ytterbium fiber laser tunable in the 980~1070 nm spectral range [J]. Opt Lett, 2003, 28(17): 1522-1524.
- 6 Zhang Xin, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Dissipative-soliton mode locked laser based on large-mode-area photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1863-1869.  
张鑫,胡明列,宋有健,等. 大模场面积光子晶体光纤耗散孤子锁模激光器[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1863-1869.
- 7 Zhao Hui, Chai Lu, Ouyang Chunmei, *et al.*. A long-cavity all-

- normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2958-2963.
- 赵慧,柴路,欧阳春梅,等. 长腔全正色散锁模掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2958-2963.
- 8 Tan Fangzhou, Liu Jiang, Sun Ruoyu, *et al.*. All-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser with multimode interference effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402010.  
谭方舟,刘江,孙若愚,等. 基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402010.
- 9 L Zhang, J M Hu, J H Wang, *et al.*. Tunable all-fiber dissipative-soliton laser with a multimode interference filter[J]. Opt Lett, 2012, 37(18): 3828-3830.
- 10 H Zhang, D Y Tang, R J Knize, *et al.*. Graphene mode-locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96: 111112.
- 11 L J Kong, X S Xiao, C X Yang. Tunable all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers[J]. Laser Phys, 2010, 20(4): 834-837.
- 12 Pan Yuzhai, Liu Xiaoli, Su Xiaohui, *et al.*. Tunable large-mode-area fiber lasers based on multimode interference effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402003.  
潘玉寨,刘晓莉,苏晓慧,等. 基于多模干涉效应的可调谐大模场光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402003.
- 13 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.  
刘江,王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 14 K Kieu, W H Renninger, A Chong, *et al.*. Sub-100 fs pulses at watt-level powers from a dissipative-soliton fiber laser[J]. Opt Lett, 2009, 34(5): 593-595.
- 15 J An, D Kim, J W Dawson, *et al.*. Grating-less, fiber-based oscillator that generates 25 nJ pulses at 80 MHz, compressible to 150 fs[J]. Opt Lett, 2007, 32(14): 2010-2012.

栏目编辑:宋梅梅