

1 μm 波段宽带可调谐锁模光纤激光器

苟斗斗¹ 杨四刚¹ 尹飞飞² 张磊¹ 邢芳俭¹ 陈宏伟¹ 陈明华¹ 谢世钟¹

(¹ 清华大学电子工程系信息科学与技术国家实验室, 北京 100084
² 北京邮电大学电子工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 报道了一种工作于 1 μm 波段、正常色散区、基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的被动锁模光纤激光器。激光器以高掺杂 Yb 光纤为增益物质, 结合可调谐滤波器, 形成环形腔结构。采用 976 nm 半导体激光器抽运, 当抽运功率大于 16 dBm 时, 激光器可实现 1033~1069 nm 波长范围内重复频率为 25.4 MHz 的宽带可调谐输出, 性能稳定, 在调谐范围内均可观测到非常规则的矩形输出光谱。在固定抽运功率下, 对调谐范围内输出功率、光谱带宽、时域脉宽进行了实验测量和分析。在波长为 1064 nm 时, 用单通道光栅对将谱宽为 1.745 nm、时域脉宽为 34.85 ps 的脉冲压缩至 15.45 ps。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 半导体可饱和吸收镜; 可调谐; 正色散; 环形腔; 脉冲压缩

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706013

Widely Tunable Mode-Locked Fiber Laser Operating in 1 μm Wavelength Range

Gou Doudou¹ Yang Sigang¹ Yin Feifei² Zhang Lei¹ Xing Fangjian¹
Chen Hongwei¹ Chen Minghua¹ Xie Shizhong¹

¹ Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology,

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Based on a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), an all-normal-dispersion ring cavity, tunable, ytterbium-doped passively mode-locked fiber ring laser is reported. Pumped by a 976 nm semiconductor laser, when the pumping power is more than 16 dBm, the fiber laser can realize tunnable output from 1033 nm to 1069 nm smoothly at a repetition rate of 25.4 MHz, and a regularly rectangular spectrum is produced. The dependence of output power, bandwidth, and domain pulse-width on wavelength is analyzed in detail at a fixed pumping power. The experimental setup is compact and self-started. In addition, the output pulse, with a spectrum width of 1.745 nm and time domain width of 34.85 ps at 1064 nm, is compressed to 15.45 ps by using single-channel grating pairs.

Key words fiber optics; fiber laser; semiconductor saturable absorber mirror; tunable; all-normal dispersion; ring-cavity; pulse compression

OCIS codes 060.2320; 060.2410; 060.3510; 140.3510

1 引言

近年来,超短脉冲在众多的应用领域吸引着大

众的眼光,如激光微加工、薄膜生产、激光清洗等,并且在药学和生物领域也备受关注。基于掺镱光纤

收稿日期: 2013-03-25; **收到修改稿日期**: 2013-05-06

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327606)、国家自然科学基金(61108007)、集成光电子学国家重点联合实验室开放基金

作者简介: 苟斗斗(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器及振荡器方面的研究。

E-mail: gdd07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 杨四刚(1978—),男,博士,讲师,主要从事光纤激光器、振荡器等方面的研究。E-mail: ysg@tsinghua.edu.cn
(通信联系人)

(YDF)的锁模激光器以其结构简单、非线性低、转换效率高、吸收谱和发射谱较宽以及对热光效应不敏感等优点得到广泛关注和迅速发展,用 YDF 构成激光器产生超短脉冲已有大量报道。2002 年,孙宏志等^[1]基于掺镱的双包层光纤实现了 1070~1150 nm 范围内连续可调谐的光纤激光器。2005 年,马海全等^[2]基于非线性环形镜和 8 字形腔结构得到中心波长为 1053 nm、脉宽为 234 ps 的脉冲;基于非线性偏振旋转技术和环形腔结构产生 1050 nm 和 1544 nm 波长的激光器也被广为报道^[3-4],2007 年,王旌等^[5]基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)和环形腔结构实现了中心波长为 1562.8 nm、脉宽为 377 fs 的短脉冲激光器,2008 年,宋有建等^[6]基于偏振旋转技术结合饱和吸收体,用双包层大模场面积 YDF 构成环形腔,实现波长为 1079 nm,脉宽为 10.6 ps 的激光器。2011 年,张攀政等^[7-8]分别基于半导体和石墨烯可饱和吸收体实现了 1030 nm 和 1074 nm 附近波长的锁模 YDF 激光器。其中 SESAM 的应用极大地提高了锁模激光器的自启动和脉冲整形性能^[9-10],同时可简化实验装置,稳定性好^[11]。2012 年,白扬博等^[12-13]在正常色散区用反射型体光栅和 SESAM 实现线型腔结构的 YDF 激光器,中心波长在 1011.9~1050.6 nm 范围内连续可调谐。同年,Zhang 等^[14]用多模干涉滤波器在正常色散区基于耗散孤子实现了全光纤结构的掺镱锁模激光器,其中心波长为 1032 nm,可调谐范围为 12 nm。

一般地,锁模激光器工作于反常色散区可有利于超短脉冲的产生,光纤的非线性效应和克尔效应可产生孤子脉冲,实现脉冲压缩功能。由于光纤在 1550 nm 波长时正好位于反常色散区,故用于产生超短脉冲的锁模激光器大多位于该波长附近,并获得很大的发展^[15-16]。而工作于 1060 nm 附近时光纤处于正常色散区,可导致脉冲展宽,2011 年,在正常色散区基于掺镱光纤实现 1060 nm 附近波长的锁模激光器也有所报道^[17-19]。光纤工作于正常色散区会影响超短脉冲的产生,故需在锁模腔中引入色散补偿以使其工作于反常色散区,如通过棱镜或光栅对实现^[20]。

近年来,鲜有基于 SESAM 和环形腔结构实现 1060 nm 波段宽带可调谐激光器的报道,在 1060 nm 波段的很多非线性实验均要求较大范围的可调谐功能,如目前广受关注的光纤参量放大和光纤参量振荡器等研究,均要求激光器与光纤零色散波长较为精确匹配,进而要求激光器可在 1060 nm 波长附近稳定可

调谐。本文在正常色散区基于 SESAM 及环形腔结构实现可调谐 YDF 锁模激光器,在 1033~1069 nm 范围内可稳定调谐,有效覆盖 1060 nm 波段。引入 SESAM 和可调滤波器,使整套装置结构简单,操作方便,锁模稳定。

2 实验装置及原理

基于 SESAM 的锁模激光器结构如图 1 所示。976 nm 半导体激光器(LD)产生的抽运光进入长度为 93 cm、吸收率为 250 dB/m 的单模 YDF(NUFERN SM-YSF-HI)。该 YDF 在 1060 nm 波长处纤芯直径为 7.5 μm 。腔内的光场经环形器进入 SESAM。该环形器从端口 2 到端口 1 和从端口 3 到端口 2 的隔离度均高达 35 dB,故腔中无需再加隔离器。环形腔通过偏振控制器(PC)调整偏振,由可调谐滤波器(Koshin Kogaku model FC-1074B)进行波长选择,其可调谐范围为 1045~1065 nm,带宽为 20 nm,隔离度为 35 dB。经波分复用器(WDM)形成环形腔结构。实验装置均通过 Hi-1060 单模光纤连接,因此该系统工作于正常色散区。脉冲通过耦合器 10% 端口输出,经一光栅对(G1,G2,600 lp/mm)进行压缩。各器件之间通过熔接进行有效连接从而减少腔内损耗至 6 dB,在可调谐范围内减小阈值功率至 15.36 dBm,比法兰连接更加可靠、稳定。

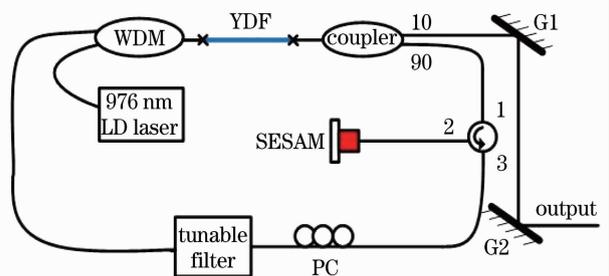


图 1 基于 SESAM 的环形腔 YDF 锁模激光器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the passively mode-locked fiber ring laser based on SESAM

SESAM (BATOP Company, sam-1064-30-x-1 ps)由半导体可饱和吸收体和布拉格反射镜组合构成非线性吸收器件。饱和吸收体透射率与光强相关。弱信号经饱和吸收体后被吸收,损耗大,强信号通过吸收体时使其饱和甚至深度饱和,吸收小。其高能级寿命 τ ($\sim 10^{-9}$ s) $\ll 2L'/c = 3.94 \times 10^{-8}$ s,其中 L' 为有效腔长。则强脉冲经过后,吸收体透射率可迅速恢复,保证下一个脉冲经过时的正常吸收。腔中增益介质 Yb^{3+} 纵向弛豫时间 T 满足

$T(\sim 10^{-4} \text{ s}) \gg \frac{L'}{2c}$, 故强光和弱光增益相当。但损耗差异大, 故强光不断增强形成震荡, 而弱光被不断吸收。且强光前后沿比峰值吸收大, 故经过饱和吸收体后光脉冲被反复压缩变窄, 实现压缩整形效果, 频谱得以展宽。该饱和吸收体调制深度 $\Delta R = 17\%$, 饱和通量 $\Phi = 42 \text{ J/cm}^2$, 其色散因子与反射率随波长的变化如图 2 所示。

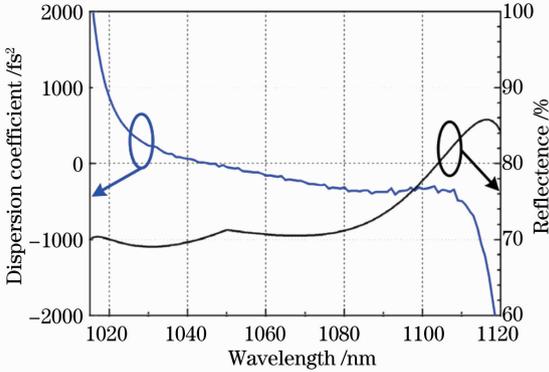


图 2 SESAM 的色散及反射曲线

Fig. 2 Dispersion and reflectance curve of the SESAM

从图 2 中可看出, 该饱和吸收镜色散随波长增大而减小, 在 1030~1100 nm 范围内变化平缓, 在 1040~1060 nm 之间色散很小, 波长为 1047 nm 时色散值为 0。反射率大致随波长增加而增大, 在 1020~1080 nm 范围内变化平缓, 且保持 70% 的高反射率。

实验中锁模激光器脉冲用光谱分析仪 (OSA, Ando AQ6317B) 观测, 时域波形经过 10 GHz 的探测仪 (PD) 进行光电转换, 在 50 GHz 采样率的示波器 (DSO, Tektronix DPO72004B) 上测量, 脉宽借助于自相关仪 (FEMTOCHROME, FR-103XL) 分析。激光器锁模产生的频率梳用 40 GHz 电谱仪 (ESA, Anritsu MS2668C) 进行有效测量。

3 实验结果与讨论

抽运功率大于 38 mW 时, 调整 PC, 激光器可在中心波长为 1033.4~1069.7 nm 范围内实现稳定锁模, 如图 3 所示。近年来 1060 nm 波长的光在医学、生物等领域受到广泛关注, 故实验中以 1060 nm 波长为例分析激光器性能。图 3(a) 为用 ESA 测量得到的频率梳, 分辨率带宽 (RBW, f_{RBW}) 为 10 KHz, 可得输出脉冲基频 f 为 25.4 MHz, 由 $L = \frac{c}{nf}$ 可计算得等效腔长 L 为 8.12 m, 其中有效折射率 n 取 1.455, c 为真空中的光速。该实验装置用的康宁 Hi 1060 光纤在 1060 nm 波长时色散值 D 为 $-38 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 由 (1) 式可得群速度色散 (GVD) β_2 为 $22.65 \text{ ps}^2/\text{km}$ 。由图 2 可知 SESAM 在 1060 nm 波长时色散很小, 则可计算出环形腔色散约为 0.19 ps^2 , 故激光器工作于正常色散区, 啁啾大, 使脉冲时域展宽。

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D. \quad (1)$$

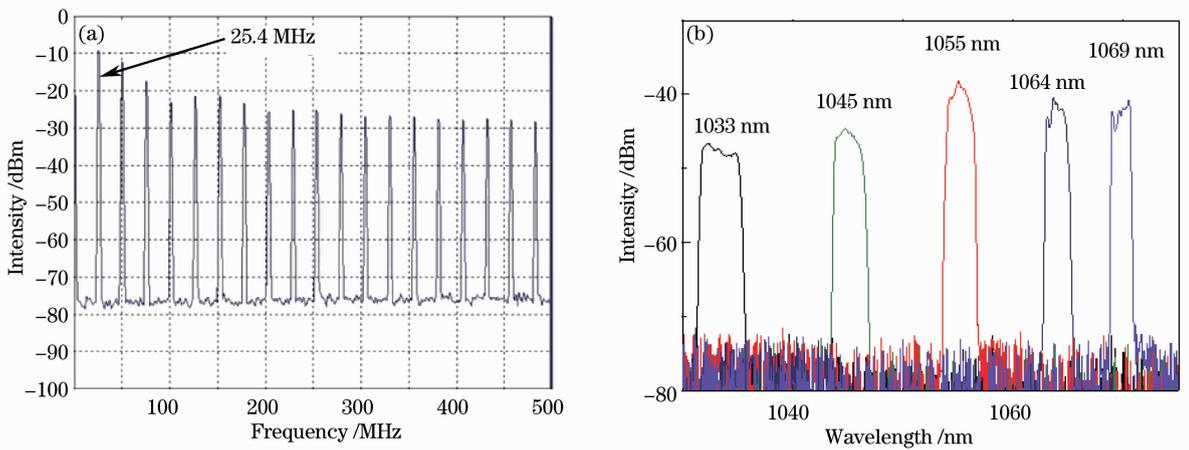


图 3 单脉冲输出。(a) 频率梳; (b) 光谱图

Fig. 3 Output of single-pulse. (a) Frequency spectrum; (b) optical spectrum

图 3(b) 为用 OSA 在分辨率为 0.02 nm 时, 基于 1033~1069 nm 可调谐范围, 在中心波长为 1033, 1045, 1055, 1064, 1069 nm 时测量得到的光谱

图。从图中可观测到非常规则的矩形谱, 在调谐范围内信噪比 (SNR) 均超过 30 dB, 可见激光器锁模良好, 性能稳定。激光器输出脉冲表现为窄带形式,

谱宽均小于 2.7 nm, 并随波长增大而减小。其主要原因在于可调谐滤波器带宽为 (3 ± 0.5) nm, 因此脉冲单色性更好。同时由于光纤系统处于正常色散区, 加倍导致时域展宽, 传输中与光纤有效作用时间更长, 很适用于光纤参量放大或光纤参量振荡器实验。

用 DSO 对脉冲时域波形进行测量, 如图 4(a) 所示, 周期为 39.4 ns。自相关仪测得波长为 1064 nm 的时域脉冲半峰全宽 (FWHM) τ 为 34.85 ps, 如

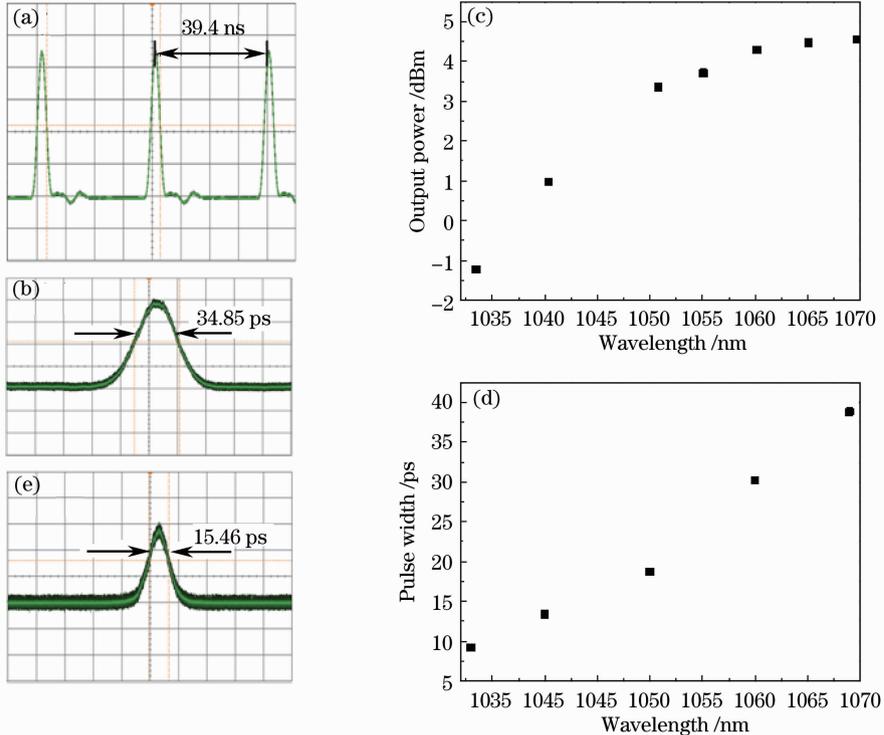


图 4 (a)示波器测量曲线;(b)压缩前自相关仪测量曲线;(c)输出功率随波长变化曲线;
(d)脉冲宽度随波长变化曲线;(e)压缩后自相关仪测量曲线

Fig. 4 (a) Oscilloscope trace; (b) autocorrelation waveform before compression; (c) dependence of output power on wavelength; (d) dependence of pulse width on wavelength; (e) autocorrelation waveform after compression

由于环形腔有较大的正常色散而导致脉冲啁啾大, 脉冲展宽, 实验中以 1064 nm 波长为例, 用光栅对 (600 lp/mm) 组成的单通道压缩装置对输出脉冲进行压缩, 输出脉冲以 20° 入射, 光栅对间距为 3.05 m。若有三角棱镜, 可设计为双通道压缩装置, 则光栅对之间的距离相当于增大一倍, 则脉冲还有进一步压缩的空间。通过自相关仪测量, 经 PD 在 DSO 上成像, 如图 4(e) 所示, 计算转换后可得脉宽为 15.46 ps, 压缩效果良好。

4 结 论

基于 SESAM, 实现了正常色散区环形腔结构

图 4(b) 所示, 功率计测得平均功率 P_a 为 4.29 dBm (2.69 mW), 由 $Q_s = P_a / f$ 可得单脉冲能量 Q_s 为 0.11 nJ, 由 $P_p = Q_s / \tau$ 可得脉冲峰值功率为 3.04 W。固定抽运功率为 38 mW, 输出功率随波长的变化趋势如图 4(c) 所示。可以看出, 随着波长增大, 输出功率增大并逐渐趋于恒定, 在 1069 nm 时达到最大, 即 4.47 mW。图 4(d) 可看出脉宽随波长增大而增大, 在波长 1033 nm 和 1069 nm 时得到脉宽极值分别为 9 ps 和 39 ps。

的可调谐 YDF 锁模激光器。激光器可在较低抽运功率 (38 mW) 下在 1033~1069 nm 波长范围内调谐, 锁模稳定, 脉冲重复频率为 25.4 MHz。对调谐范围内谱宽、输出功率、时域宽度随波长的变化进行了详细分析, 脉冲带宽小, 单位波长能量集中, 可有效利用于光纤参量放大等领域。输出脉冲时域宽度最小为 9 ps, 并在 1064 nm 波长处成功用光栅对将输出脉冲从 34.85 ps 压缩至 15.46 ps。

参 考 文 献

- 1 Sun Hongzhi, Liang Jianzhong, Hu Yimei, *et al.*. A high efficient tunable Yb doped double cladding fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1372-1374.
- 孙宏志, 梁建中, 胡谊梅, 等. 高效率可调谐掺镱双包层光纤激

- 光器研究[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1372—1374.
- 2 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei, *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1173—1177.
马海全, 刘畅, 赵卫, 等. 8 字形腔锁模掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1173—1177.
 - 3 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang, *et al.*. Passive Q-switching and mode locking Yb³⁺-doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1021—1024.
甘雨, 向望华, 周晓芳, 等. 被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1021—1024.
 - 4 Song Fang, Xu Wencheng, Chen Weicheng, *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er³⁺-doped fiber ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1174—1177.
宋方, 徐文成, 陈伟成, 等. 78 fs 被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1174—1177.
 - 5 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, 张隰. 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.
 - 6 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Qingwen, *et al.*. A mode-locked Yb³⁺-doped double-clad large-mode-area fiber laser [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5055—5058.
宋有建, 胡明列, 刘庆文, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积光纤锁模激光器[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5055—5058.
 - 7 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao, *et al.*. Mode-locking and multiwavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302001.
张攀政, 范薇, 汪小超, 等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302001.
 - 8 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke, *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802001.
刘江, 吴思达, 王科, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802001.
 - 9 M Guina, N Xiang, A Vainionpää, *et al.*. Self-starting stretched-pulse fiber laser mode locked and stabilized with slow and fast semiconductor saturable absorbers [J]. Opt Lett, 2001, 26(22): 1809—1811.
 - 10 M Guina, N Xiang, O G Okhotnikov. Stretched-pulse fiber lasers based on semiconductor saturable absorbers [J]. Appl Phys B, 2002, 74(1): S193—S200.
 - 11 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.
 - 12 Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, *et al.*. Wavelength-tunable linear-cavity passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on volume Bragg grating [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(21): 214208.
白扬博, 向望华, 祖鹏, 等. 基于体光栅的被动锁模可调谐线型腔掺镱光纤激光器 [J]. 物理学报, 2012, 61(21): 214208.
 - 13 Bai Yangbo, Xiang Wanghua, Zu Peng, *et al.*. Tunable two wavelengths linear-cavity Yb-doped fiber laser based on volume grating [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102004.
白扬博, 向望华, 祖鹏, 等. 基于体光栅的可调谐线型腔掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102004.
 - 14 Lei Zhang, Jinmeng Hu, Jianhua Wang, *et al.*. Tunable all-fiber dissipative-soliton laser with a multimode interference filter [J]. Opt Lett, 2012, 37(18): 3828—3830.
 - 15 K Tamura, E P Ippen, H A Haus, *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. Opt Lett, 1993, 18(13): 1080—1082.
 - 16 F Wang, A G Rozhin, V Scardaci, *et al.*. Wideband-tunable, nanotube mode-locked, fibre laser [J]. Nat Nanotechnol, 2008, 3(12): 738—742.
 - 17 Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214005.
张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器 [J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214005.
 - 18 Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900130.
张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900130.
 - 19 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镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2958—2963.
 - 20 H Lim, F Ö Ilday, F W Wise. Generation of 2 nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. Opt Lett, 2003, 28(8): 660—662.

栏目编辑: 王晓球