

# 1 $\mu\text{m}$ 波段宽带可调谐锁模光纤激光器

苟斗斗<sup>1</sup> 杨四刚<sup>1</sup> 尹飞飞<sup>2</sup> 张 磊<sup>1</sup> 邢芳俭<sup>1</sup> 陈宏伟<sup>1</sup> 陈明华<sup>1</sup> 谢世钟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学电子工程系信息科学与技术国家实验室, 北京 100084  
<sup>2</sup> 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  $\mu\text{m}$  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 $\mu\text{m}$ Wavelength Range

Gou Doudou<sup>1</sup> Yang Sigang<sup>1</sup> Yin Feifei<sup>2</sup> Zhang Lei<sup>1</sup> Xing Fangjian<sup>1</sup>  
Chen Hongwei<sup>1</sup> Chen Minghua<sup>1</sup> Xie Shizhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology,

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

<sup>2</sup> 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)



$T(\sim 10^{-4} \text{ s}) \gg \frac{L'}{2c}$ , 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。

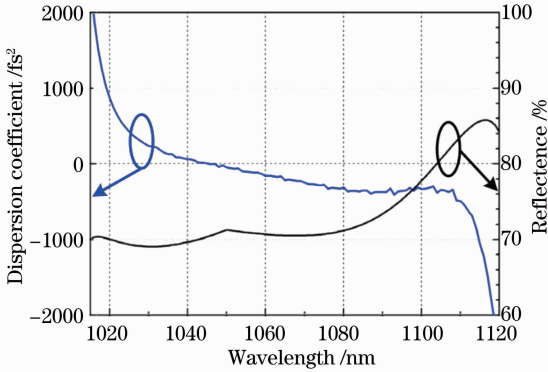


图 2 SESAM 的色散及反射曲线

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,  $f_{\text{RBW}}$ ) 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)  $\beta_2$  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  $0.19 \text{ ps}^2$ , 故激光器工作于正常色散区, 啁啾大, 使脉冲时域展宽。

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

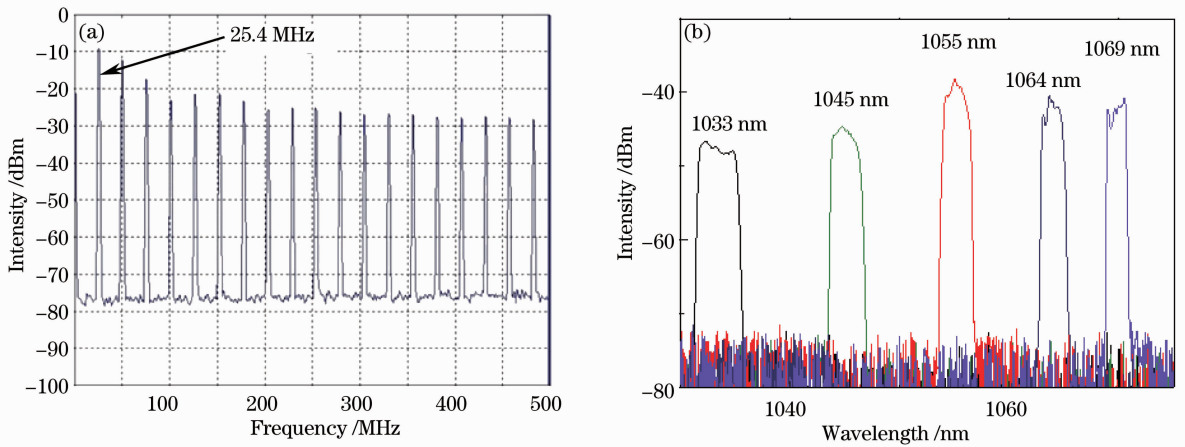


图 3 单脉冲输出。(a) 频率梳; (b) 光谱图

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  $(3 \pm 0.5)$  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)  $\tau$  为 34.85 ps, 如

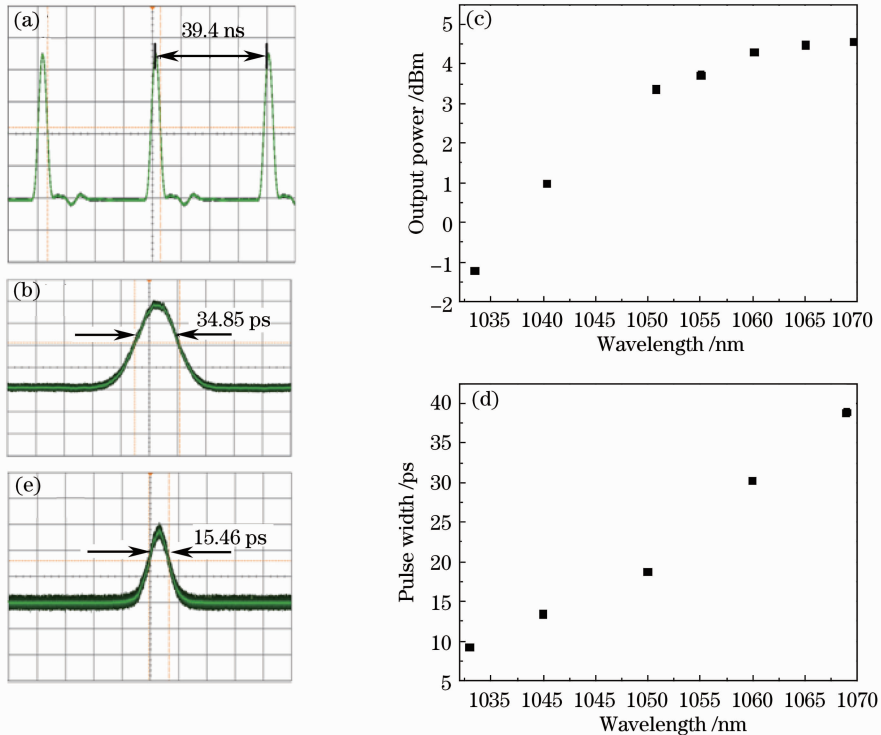


图 4 (a)示波器测量曲线;(b)压缩前自相关仪测量曲线;(c)输出功率随波长变化曲线;  
(d)脉冲宽度随波长变化曲线;(e)压缩后自相关仪测量曲线

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  $20^\circ$  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 Yb<sup>3+</sup>-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 Yb<sup>3+</sup> 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 Yb<sup>3+</sup>-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 Er<sup>3+</sup>-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 Er<sup>3+</sup> 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 Yb<sup>3+</sup>-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 Yb<sup>3+</sup> 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