

## 1 015~1 046 nm 可调谐飞秒掺镱光纤激光器

刘梦霖, 赵 坤, 闫 炜, 王丽莎, 刘民哲\*, 王 勇, 孙松松

(齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 近年来, 超快掺镱锁模光纤激光器由于其转换效率高、操作方便、免维护、尺寸紧凑等优点, 被广泛应用于工业加工、医疗外科、多光子成像等领域。在激光器中补偿群速度色散是获得皮秒甚至飞秒脉冲的有效方法。通过利用光栅对与光谱滤波器, 实现了对激光波长、腔内色散和光谱宽度的灵活调节。该激光器能输出稳定的锁模脉冲, 对应的基本重复频率为 19.41 MHz。在+0.0127 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1015~1037 nm 可调; 在+0.007 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1015~1045 nm 可调以及在-0.0127 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1020~1046 nm 可调。同时, 当净腔色散从反常色散到近零色散变化时, 光谱带宽可从 1.40 nm 调到 19.38 nm, 对应的压缩后脉冲宽度可从 1.03 ps 调至 175.9 fs。该方案具备连续调整激光器状态的能力, 有望用于高功率大能量飞秒激光前端, 可以满足对激光器有多种谱宽及波长的应用需求。

**关键词:** 飞秒; 掺镱激光器; 光栅对; 激光调谐

中图分类号: TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210444

## 1 015-1 046 nm tunable femtosecond Yb-doped fiber laser

Liu Menglin, Zhao Kun, Yan Wei, Wang Lisha, Liu Minzhe\*, Wang Yong, Sun Songsong

(Laser Institute, Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In recent years, ultra-fast ytterbium doped mode-locked fiber lasers have been widely used in industrial processing, medical surgery, multiphoton imaging and other fields due to their high conversion efficiency, convenient operation, free maintenance and compact size. Compensation of group velocity dispersion in lasers was an effective method to obtain picosecond or femtosecond pulses. A grating pair and a spectral filter were used to adjust the dispersion and spectral width of laser wavelength in cavity flexibly, the laser can output stable mode-locked pulses with the corresponding fundamental repetition frequency of 19.41 MHz. The central wavelength can be adjusted from 1015 nm to 1037 nm when the net cavity dispersion was +0.0127 ps<sup>2</sup>. In the case of +0.007 ps<sup>2</sup> dispersion, the central wavelength can be adjusted from 1015 nm to 1045 nm and when the net cavity dispersion was -0.0127 ps<sup>2</sup>, the central wavelength can be adjusted from 1020 nm to 1046 nm. Meanwhile, when the net cavity dispersion changed from abnormal to nearly zero dispersion, the spectral bandwidth can be adjusted from 1.40 nm to 19.38 nm, and the corresponding pulse width after compression can be adjusted from 1.03 ps to 175.9 fs. The proposed and demonstrated scheme is capable of continuously adjusting the state of the laser, and is expected to be used in the development of a femtosecond laser front-end with high power and high energy, which can meet the application requirements of lasers with a alterable of spectrum widths and wavelengths.

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-02-15

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC010202); 山东省自然科学基金(ZR2020QF094, ZR2020MF117, ZR2021MF112); 山东省科学院国际合作项目(2019GHPY12, 2020KJC-GH01); 山东省科学院青年科学基金(2019QN0027, 2019QN0030)

作者简介: 刘梦霖, 女, 工程师, 硕士, 主要从事超快激光种子及放大技术、超快激光加工等方面的研究。

通讯作者: 刘民哲, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事高功率固体放大、超快激光器研发及应用等方面的研究。

**Key words:** femtosecond; ytterbium doped fiber laser; grating pair; laser tuning

## 0 引言

近年来,飞秒光纤激光技术迅猛发展,在超快激光技术乃至整个激光领域中最为人瞩目。另一方面,随着高速大容量光纤通信系统的发展,波长可调谐光纤激光器已成为人们的研究热点。它可以在多个中心波长处产生超短脉冲,相较于仅能输出单一波长的激光器而言,成本更低,使用更加方便<sup>[1]</sup>,被广泛应用于工业加工、生物医疗、多光子成像和光学传感器等领域<sup>[2-5]</sup>。

常见的波段中,1 μm 波段的器件由于其材料特殊性,均呈现出正常的二阶色散( $\beta_2$ )。想要在该波段获得皮秒甚至飞秒脉冲的有效方法是在激光器中补偿群速度色散(GVD)<sup>[6-7]</sup>。固心/空心光子晶体光纤、高阶模光纤、拉锥光纤和空间光栅都可以提供负色散<sup>[8-9]</sup>,但前三种解决方案都只能提供一个固定的、不可调的色散量,且熔接会有较高的技术难度,很容易引入高损耗,相比之下,空间光栅却不存在上述问题。为了实现超短脉冲输出且波长可调谐,各科研机构或商业公司已经提出了多种方案:包括在腔内引入滤波器件<sup>[10]</sup>、控制光纤折射率<sup>[11]</sup>、采用光纤光栅<sup>[12]</sup>等。尽管波长可调谐超快光纤激光器已有不少相关报道,然而大多数成果目前仍存在着激光器波长调谐范围较小,且提供的可调谐波长对应光谱宽度较为固定的问题<sup>[13-15]</sup>,因此如何实现波长可调且谱宽可调的超快光纤激光器仍具有一定的探索意义。

文中搭建了全保偏波长可调、色散可调以及谱宽可调的飞秒掺镱光纤激光器。通过在激光腔内插入一对空间光栅和一个可变狭缝对整个激光器的色散和带宽进行了控制。根据腔内掺镱光纤和单模光纤提供的正常色散,调整空间光栅对之间的距离,可以使激光器的腔内净色散在+0.0127~ -0.0127 ps<sup>2</sup>之间进行调节。激光器可以输出稳定的锁模脉冲,对应的基本重复频率为 19.41 MHz,同时,连续调整光栅的间距和狭缝的相对位置,当净腔色散从反常色散到近零色散变化时,光谱带宽可以从 1.40 nm 调到 19.38 nm,对应的压缩后脉冲宽度可从 1.03 ps 调至 175.9 fs。

## 1 实验装置

基于光栅对和光谱滤波器的可调谐飞秒掺镱光

纤激光器装置如图 1 所示。整个激光器为线性腔,所使用的光纤元件均为保偏器件。在此次装置中,976 nm 泵浦光通过 976/1 030 nm 波分复用器耦合进激光腔,1.0 m 的掺镱光纤(Nufern, PM-YDF-HI-HP, 250 dB/m@ 975 nm)被用来提供增益。商用的 SESAM (semiconductor saturable absorber mirror, BATOP GmbH-SAM-1030-55-500 fs)不仅可以用来实现激光器的锁模,同时作为腔镜置于激光腔的一端。起偏器用来确保激光在腔内的以固定的偏振态运行。为了顺利地使光栅对(FINISAR, T-1000-1040-3225-94, 1 000 lines/mm)为激光腔提供负色散,使用一个中心波长为 1 030 nm,最大工作距离 200 mm 的准直器输出激光,激光经由光栅对后穿过一个可调谐狭缝(Thorlabs, VA100/M)到达高反镜(1 030 nm, 99% 反射率)再原路返回至准直器。为了使腔内保持足够的功率密度,使用输出比例为 10% 的保偏光纤耦合器作为输出端。各光纤型无源器件及掺镱光纤提供正色散,PM-YDF 群速度色散(GVD)约为 24 ps<sup>2</sup>/km。所有光纤无源元件均由 PM 980 制成,在 1 030 nm 处的 GVD 约为 24 ps<sup>2</sup>/km。实验装置中,光纤长度共 5 m,正色散量约为+0.24 ps<sup>2</sup>,提供负色散的器件为光栅对,根据公式:

$$GDD = \frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{-\lambda^3 G}{2\pi c^2 d^2 \cos^3(\gamma - \theta)} \quad (1)$$

式中: $GDD$ 为光栅对的二阶色散; $\gamma$ 为入射角; $(\gamma - \theta)$ 为衍射角; $G$ 为光栅间距; $\lambda$ 为中心波长; $d$ 为光栅常数。通过改变光栅间距,从而改变腔内净色散量。



图 1 基于腔内光栅对和光谱滤波器的可调谐飞秒掺镱光纤激光器装置

Fig.1 Setup of tunable femtosecond Yb-doped fiber laser device based on grating pair in cavity and spectral filter

实验中研究并证明了输出耦合器的位置对输出情况的影响,为了获得更好的实验结果,输出耦合器被放置于图中增益光纤后端。当输出耦合器远离色散管理部分时,输出的光谱较宽,相对应的脉宽较窄<sup>[16]</sup>。

为了保证实验的顺利进行,首先对准直器的效率进行了测试,空间部分总光程为 0.33 m,空间光往返一次的耦合效率为 52%(光栅单次透过效率为 93%,准直器耦合效率为 70%)。实验中,可调谐狭缝等同于光谱滤波器,狭缝间距限制光谱调谐的范围,此次实验中,考虑到 SESAM 的工作带宽为 30 nm,因此设计调谐带宽为 40 nm,计算了应选取的狭缝宽度,狭缝带宽光路示意图如图 2 所示,计算公式如下:

$$\sin\gamma + \sin\theta_x = m\lambda_x/d \quad (2)$$

$$\omega_{1-2} = G(\tan\theta_2 - \tan\theta_1) \cos\gamma \quad (3)$$

式中:  $\lambda_x$  为激光波长;  $\gamma$  为激光入射角;  $\theta_x$  为激光衍射角;  $G$  为光栅对间距; 光栅常数  $d=0.001$  mm;  $\omega$  为所求狭缝带宽。将数值代入后可得到狭缝带宽为 2.02 mm。

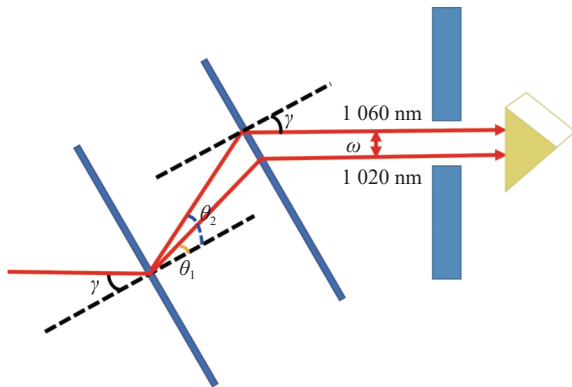


图 2 狭缝带宽光路计算

Fig.2 Slit bandwidth optical path calculation

输出光通过光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6373B, 测量分辨率为 0.02 nm)、示波器(RIGOL DS2302A, 300 MHz)和自相关仪(FEMTOCHROME FR-103XL)来测量其光谱、脉冲序列以及脉冲宽度。

## 2 结果与分析

### 2.1 给定色散下的中心波长调谐

通过提供足够的泵浦功率和调整光栅对之间的距离,当泵浦功率达到 70 mW 时,可以实现稳定的自启动模锁。激光器的重复率为 19.41 MHz,与总腔长 5.33 m 对应。利用激光单次经过光栅后出射的平行光为空间分布的特性<sup>[7]</sup>,通过在给定的色散状态下调整光谱滤波器的位置,输出脉冲的中心波长可以连续调谐,如图 3(a)所示,最初将光栅对的间距设置为

38.32 mm 时,腔内净色散为 +0.007 ps<sup>2</sup>,接近零色散,此时激光中心波长可以在 1015~1045 nm 之间调谐,

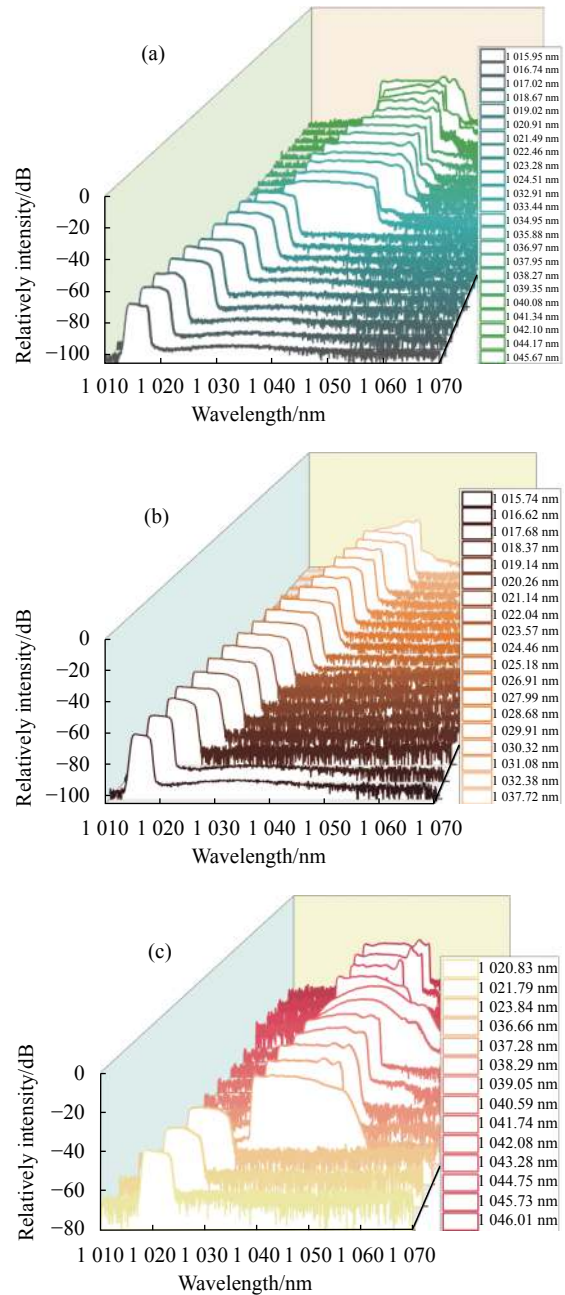


图 3 (a) 激光器在近乎零色散工作,光谱可从 1015.97 nm 调谐到 1045.67 nm; (b) 激光器在正色散下工作,光谱可从 1015.74 nm 调谐到 1037.72 nm; (c) 激光器在负色散下工作,光谱可从 1020 nm 调谐到 1046 nm

Fig.3 (a) Laser can be tuned from 1015.97 nm to 1045.67 nm when the net cavity dispersion near zero; (b) Laser works in positive dispersion and the spectrum can be tuned from 1015.74 nm to 1037.72 nm; (c) Laser operates under negative dispersion and has a spectrum tuned from 1020 nm to 1046 nm

其中,当中心波长为 1039.14 nm 时,对应最大谱宽为 19.38 nm。随后,改变光栅对之间的距离为 41.52 mm,见图 3(b),光栅对提供负色散量约为 $-0.2273 \text{ ps}^2$ ,对应腔内净色散量为 $+0.127 \text{ ps}^2$ ,中心波长从 1015~1037 nm 可调;最后将光栅对的间距设置为 37.35 mm,补偿负色散量大约为 $-0.2527 \text{ ps}^2$ ,此时腔内净色散约为 $-0.127 \text{ ps}^2$ ,光谱中心波长可从 1020 nm 调谐到 1046 nm,光谱如图 3(c) 所示。

实验过程中,为了观察其波长调谐能力,固定光谱滤波器带宽不变,以减少其他影响参量的引入,由于其位置和平移会影响激光的光谱宽度,因此激光器的输出光谱在调谐过程中会有较大差异。

### 2.2 固定中心波长下的光谱宽度调谐

随后,对净腔色散在 $+0.102 \sim -0.102 \text{ ps}^2$ 范围内进行连续调谐,固定狭缝与全反镜的相对位置,将光栅间距由近及远拉开,不断调整狭缝的位置,以保持整个色散范围的锁模,目标是使每个点的频谱带宽最大化。在腔内正常色散下,光谱带宽从 6.46 nm ( $+0.102 \text{ ps}^2$ ) 调谐到最大为 19.38 nm (近零色散)。在反常色散下也可以实现锁模操作,最大带宽从近零色散的 19.38 nm 到反常色散 ( $-0.102 \text{ ps}^2$ ) 的 1.40 nm,光谱如图 4 所示。

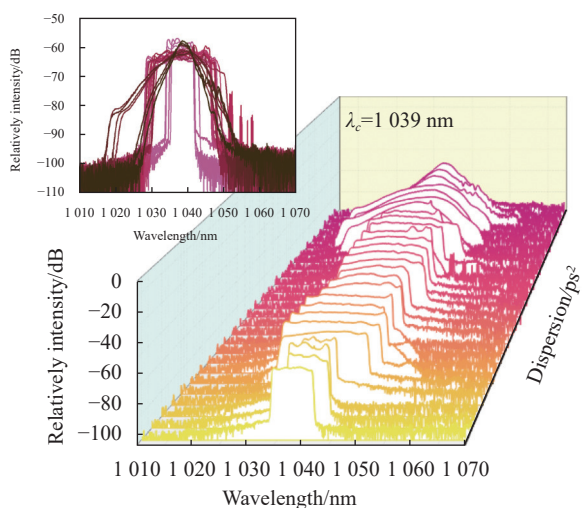


图 4 光谱宽度随腔内净色散的变化 (插图: 二维视图)

Fig.4 Variation of spectral width with different net dispersion in cavity (Insert: 2D view)

图 5 分别展示了在不同色散下的光谱、脉冲宽度以及其脉冲序列情况。图 5(a) 所示为在不同色散区

域下中心波长为 1039 nm 的光谱,正常色散下的光谱宽度为 6.46 nm,近零色散下的光谱宽度为 19.38 nm,负色散下的光谱宽度为 1.40 nm。图 5(b) 为三个色散区域下与图 5(a) 对应的脉冲宽度。反常色散下对应的脉冲宽度为 1.03 ps;正常色散下对应的脉冲宽度为 374 fs;近零色散区可压缩至最短 175.9 fs。实验过程中光栅对与可变狭缝的调节并不改变总腔长,因此该

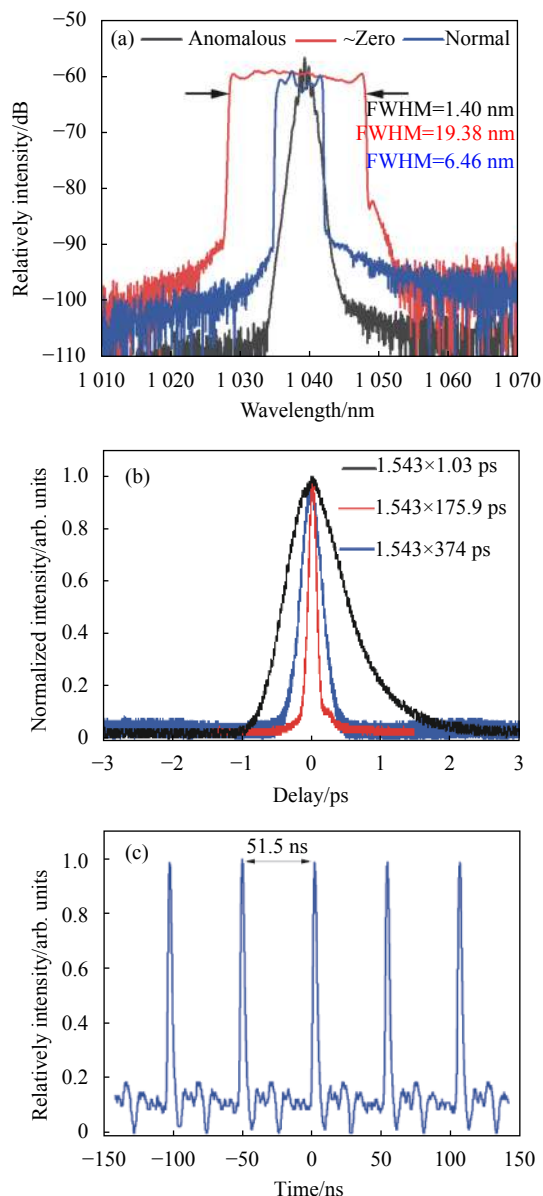


图 5 激光器在正常色散 (蓝色线)、近零色散 (红色线) 以及反常色散 (黑色线) 下的 (a) 光谱, (b) 脉冲宽度和 (c) 脉冲序列

Fig.5 Spectrum (a), pulse width (b), and pulse train (c) of the laser at normal (blue line), near-zero (red line), and abnormal (black line) dispersion



实验装置所产生的任一锁模状态所对应的基本重复频率均为 19.41 MHz, 与图 5(c) 中脉冲间隔 51.5 ns 所对应。所有实验结果表明该激光器基于此结构可以实现稳定锁模并具备多功能性, 实现在不同色散下的光谱宽度调谐以及脉冲宽度调谐。

### 3 结论

文中通过实验证明了基于光栅对和光谱滤波器结构的掺镱锁模光纤激光器可以实现色散从 +0.102~-0.102 ps<sup>2</sup> 连续可调, 其光谱宽度可由 1.4 nm 调整到最大 19.38 nm, 对应的脉宽从 1.03 ps 调到 175.9 fs。并且在 +0.0127 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1015~1037 nm 可调; +0.007 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1015~1045 nm 可调以及 -0.0127 ps<sup>2</sup> 色散时中心波长 1020~1046 nm 可调。该激光器结构相对简单, 但却具备定色散中心波长调谐以及定中心波长光谱宽度可调的能力, 可以满足工业、科学研究等多领域对多种谱宽及波长的需求, 同时可为简化超短脉冲激光器方案设计提供参考, 也有望扩展到其他锁模机制或不同波段。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Y J, Liu J, Wang P. All-fiber wavelength-tunable passively mode-locked thulium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1001003. (in Chinese)
- [2] Dai L L, Zou C H, Huang Q Q, et al. Continuously tunable mode-locked fiber laser based in tilted fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508026. (in Chinese)
- [3] Zhao S C, Qin P, Yan D Y, et al. Stable mode-locked Yb-fiber laser with a 6 MHz repetition rate tuning rang [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200205. (in Chinese)
- [4] Gu X R, Cao X R, Li Y, et al. Nonlinear pulse compression of an ANDi Yb-fiber laser by a single-mode fiber amplifier [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(10): 106105. (in Chinese)
- [5] Zhang J R, Gua Y C. Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: A review [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 199-213. (in Chinese)
- [6] Wang L Z, Xu P Z, Li Y H, et al. Femtosecond mode-locked fiber laser at 1  $\mu\text{m}$  via optical microfiber dispersion management [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4732. (in Chinese)
- [7] Andy C, William H R, Frank W W. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(2): 140-148.
- [8] Yang P L, Teng H, Fang S B, et al. 65-fs Yb-doped all-fiber laser using tapered fiber for nonlinearity and dispersion management [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1730-1733. (in Chinese)
- [9] Yu T Y, Liu X S, Andrey D P, et al. Femtosecond pulse compression using negative-curvature hollow-core fibers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 75-87. (in Chinese)
- [10] Xu Z, Dou J H, Xu X J. All-fiber wavelength-tunable Tm-doped fiber laser mode locked by SESAM with 120 nm tuning range [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(21): 5978-5981. (in Chinese)
- [11] Huang S S, Wang Y G, Yan P G, et al. Tunable and switchable multi-wavelength dissipative soliton generation in a graphene oxide mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11417-11426. (in Chinese)
- [12] Jin X X, Wang X, Wang X L, et al. Tunable multiwavelength mode-locked Tm/Ho-doped fiber laser based on a nonlinear amplified loop mirror [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8260-8264. (in Chinese)
- [13] Hou L, Guo H Y, Wang Y G, et al. Tunable ytterbium-doped mode-locked fiber laser based on single-walled carbon nanotubes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2370-2374. (in Chinese)
- [14] Wang T, Wu J, Wu H S, et al. Wavelength-tunable LP<sub>11</sub> mode pulse fiber laser based on black phosphorus [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 119: 105618. (in Chinese)
- [15] Wang W L, Wang J, Xu L W, et al. Tunable fiber lasers based in semiconductor saturable absorber mirrors [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 672-675. (in Chinese)
- [16] Hou L, Guo H Y, Wang Y G, et al. Sub-200 femtosecond dispersion-managed soliton ytterbium-doped fiber laser based on carbon nanotubes saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9063-9070. (in Chinese)
- [17] Zhang Z G. Femtosecond Laser Technology[M]. 2nd ed, Beijing: Science Press, 2017: 60-61. (in Chinese)