

## 基于飞秒激光直写 FBG 的 C+L 波段掺铒光纤激光器(特邀)

何 巍<sup>1,2</sup>, 袁宏伟<sup>1,2</sup>, 孟凡勇<sup>1,2</sup>, 宋言明<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016)

**摘要:** 提出并设计了一种基于飞秒激光直写制备光纤布拉格光栅阵列的 C+L 波段掺铒光纤激光器, 实现了波长可切换的单波长及双波长激光输出。采用飞秒激光透过聚酰亚胺光纤保护层在纤芯直写的方法, 分别实现周期为 538、542、547 nm 的光纤布拉格光栅刻写, 单个光栅栅区长度 3 000  $\mu\text{m}$ 。作为选频器件的光栅阵列反射波长分别为 1 555.5、1 569.6、1 583.8 nm; 选用长度为 3 m 的 C 波段和 10 m 的 L 波段掺铒光纤组合作为激光器增益介质, 结合泵浦源、光纤布拉格光栅偏振控制器及宽带全反镜构成线形腔结构光纤激光器。实验结果表明: 激光器工作阈值为 35 mW, 通过调节偏振控制器能够实现 1 555.4、1 569、1 583.2 nm 单波长激光可切换输出, 激光 3 dB 线宽 0.05 nm, 边模抑制比大于 35 dB; 实验中分别对单波长激光的光谱稳定性进行了测试, 10 min 内最大功率波动小于 0.98 dB; 通过调节偏振控制器可分别实现 1 569、1 583.2 nm 以及 1 555.4、1 569 nm 双波长激光同时输出, 在 10 min 监测时间内, 输出激光功率变化分别小于 1.14 dB 和 4.48 dB。

**关键词:** 光纤激光器; 飞秒激光; 光纤布拉格光栅; 掺铒光纤

**中图分类号:** O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0734001

## C+L band Erbium-doped fiber laser based on FBG fabricated by femtosecond laser(Invited)

He Wei<sup>1,2</sup>, Yuan Hongwei<sup>1,2</sup>, Meng Fanyong<sup>1,2</sup>, Song Yanming<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;
2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

**Abstract:** A switchable and stable single- and dual-wavelength C+L band Erbium-doped fiber laser based on FBG array fabricated by femtosecond laser was proposed and experimentally demonstrated. Fiber grating period of 538, 542, 547 nm was realized on polyimide fiber core through fiber protection and cladding by femtosecond laser, grating length was 3 000  $\mu\text{m}$ , and reflection spectrum of each FBG was 1 555.5, 1 569.6, 1 583.8 nm, respectively; the length of 3 m C-band Erbium-doped fiber and 10 m L-band were used as the gain medium, and the proposed fiber laser was composed of gain medium,

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT16RO7); 北京市属高校高水平教师队伍支持计划(IDHT20170509); 第三届青年人才托举工程(2017QNRC001)

作者简介: 何巍(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感及光纤激光器方面的研究。Email: gregg1986@sina.com

通讯作者: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统方面的研究。

Email: zhulianqing@sina.com

pump source, FBG, PC and broadband reflection mirror. In the experiment, the laser working threshold was 35 mW, through adjusting the polarization controller, a switchable single-wavelength of 1 555.4, 1 569, 1 583.2 nm laser was obtained, 3 dB linewidth was 0.05 nm, and SNR was more than 35 dB; The spectral stability of single-wavelength laser was tested in the experiment, and it was found that the power fluctuation of each single-wavelength laser was less than 0.98 dB over 10 min; by adjusting the polarization controller, the proposed fiber laser had the capability to produce switchable 1 569, 1 583.2 nm and 1 555.4, 1 569 nm dual-wavelength laser simultaneously, and the power shift was less than 1.14 dB and 4.48 dB, respectively over 10 min monitoring time.

**Key words:** fiber laser; femtosecond laser; FBG; Erbium-doped fiber

## 0 引言

波长可调谐的窄线宽光纤激光器具有结构紧凑、低损耗、波长灵活可调谐、高信噪比、激光线宽窄等特点<sup>[1-2]</sup>,其中掺铒光纤激光器覆盖 C+L 波段(1 520~1 600 nm),能够广泛应用于光通信、激光雷达、生物医学、光谱分析等领域<sup>[3]</sup>。因此,开展不同波段波长可调谐光纤激光器方面的研究,实现高稳定性的光纤激光输出已经成为本领域的研究热点。

目前,国内外针对波长可切换掺铒光纤激光器的研究已经取得了很大的进展,设计采用级联光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)<sup>[4]</sup>、保偏光纤光栅<sup>[5]</sup>、光子晶体光纤<sup>[6]</sup>、高双折射光纤<sup>[7]</sup>、Sagnac 环<sup>[8]</sup>、光纤 Fabry-Perot 滤波器<sup>[9]</sup>、光纤 Mach-Zehnder 滤波器<sup>[10]</sup>等光纤光学器件都能够实现波长灵活可切换的窄线宽激光输出。综上所述,采用以上技术可以实现多波长可调谐光纤激光输出,其中选频器件的性能与输出激光的光谱特性密切相关,由于系统中通常采用特种光纤,或是在腔内接入外部调制结构,往往增加了系统的复杂程度。

布拉格光纤光栅作为一种选频器件已经广泛应用于光纤激光器的设计与制作,具有输出激光线宽窄、高信噪比、稳定性好等特点;同时,FBG 也是一种重要光纤传感器件<sup>[11]</sup>,具有体积小、抗电磁干扰、工作寿命较长等特点。目前,通常采用紫外曝光方式在去除保护层的光纤纤芯中实现 FBG 的制备,并采用光纤再涂覆技术对栅区进行保护;近年来,采用飞秒激光制备 FBG 已经成为光纤传感领域的研究热点之一,通过该方法制备 FBG 具有高强度及耐高温的特点<sup>[12]</sup>。文中研究并设计基于飞秒

激光透过光纤保护层直写制备 FBG 阵列的方法,并设计将 FBG 作为选频器件搭建线形腔结构的掺铒光纤激光器,对激光器的产生原理和设计结构进行了分析和实验,最终在 C+L 波段实现了稳定的波长可切换窄线宽光纤激光输出。

## 1 系统结构设计及原理

掺铒光纤激光器系统原理如图 1 所示。泵浦光由波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)耦合进入 C 波段增益光纤(C-band Erbium-Doped Fiber, EDFC)和 L 波段增益光纤(L-band Erbium-doped Fiber, EDFL),环形镜(Fiber Loop Mirror, FLM)和布拉格光纤光栅串(FBGs)构成的谐振腔的两端,其中 FLM 由分光比为 50:50 的 2×2 熔融拉锥型耦合器(3 dB OC)的两个输出端熔接在一起构成,当耦合器分光比为 0.5 时,环形镜对于 1.5 μm 波段范围的光具有全反射的效果。三个反射波长不同的 FBG 进行级联作为激光器的选频器件,宽带反射镜(Broadband Reflection Mirror, BRM)与 FBG 阵列进行熔接用于提高激光器的工作效率;偏振控制器(Polarization

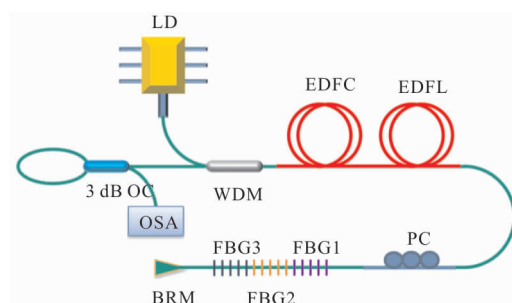


图 1 光纤激光器原理图

Fig.1 Diagram of proposed fiber laser

Controller, PC)用于调节激光器偏振态;光谱分析仪(OSA)与 3 dB 耦合器输出端连接对激光输出光谱进行采集。

设计采用飞秒激光直写方法实现 FBG 制作,其加工系统原理如图 2(a)所示,飞秒激光光源发出波长 800 nm 的激光经过反射镜照射到浸油物镜,经过放大倍率为 63 倍的油镜后聚焦在光纤纤芯上;采用 CCD 对光纤刻写过程进行实时监测,光开关(Shutter)用于控制激光输出。在刻写过程中为了对 FBG 光谱特性进行监测,设计将 C+L 波段 ASE 光源经过光纤环行器(Circulator)后耦合进入刻写的单模光纤(Single Mode Fiber, SMF),另一端与光谱分析仪相连接对 FBG 反射谱数据进行采集。

设计采用飞秒激光透过光纤聚酰亚胺涂层(Polyimide coating)表面聚焦至纤芯的方法实现 FBG 阵列刻写,其原理如图 2(b)所示,FBG1、FBG2 和 FBG3 栅区长度相同。光纤光栅的反射或透射波长光谱取决于光栅周期和纤芯有效折射率,光纤光栅方程如公式(1)所示:

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\Lambda$  为光栅周期; $n_{eff}$  为纤芯有效折射率。因此,通过刻写不同周期的光栅能够实现不同反射波长

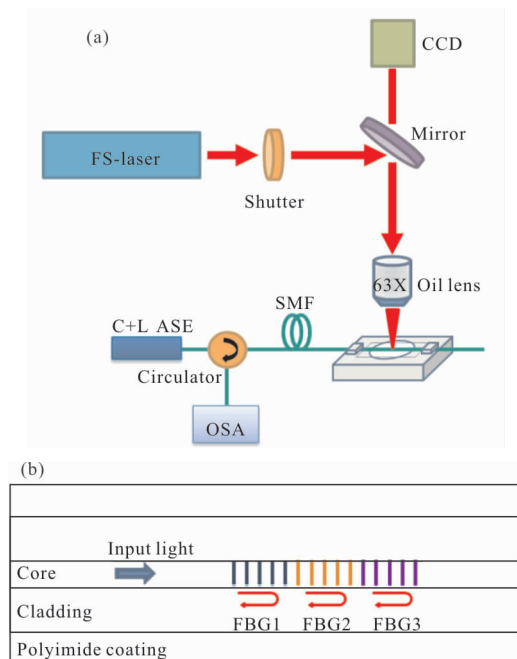


图 2 (a)飞秒激光直写 FBG 系统;(b) FBG 阵列原理

Fig.2 (a) FBG fabricating system based on femtosecond laser; (b) principle of FBG array

FBG 的制备。

## 2 实验及结果分析

基于如图 2(a)所示的结构搭建了飞秒激光 FBG 刻写系统,飞秒激光器重频 1 kHz,脉冲宽度 35 fs,待加工光纤为聚酰亚胺涂覆层光纤(SM1500(9/125), Fiber Core Co.),加工镜为 Olympus 公司生产的 63 倍浸油物镜,折射率匹配液值为 1.45。实验中将不去除聚酰亚胺涂层的光纤固定在三维移动平台上,并通过调节光纤位置将飞秒激光聚焦在纤芯处。设计制作刻写周期分别为 538、542、547 nm 的一阶 FBG,光栅栅区长度均为 3 000  $\mu\text{m}$ ,并且栅区之间紧密连接。刻写周期为 542 nm 时,光纤光栅影像如图 3(a)所示。实验中通过对光斑大小进行优化实现了反射波长分别为 1 555.5、1 569.6、1 583.8 nm 的 FBG 制作,FBG 反射波长位于 C 波段(1520~1560nm)及 L 波段(1560~1 600 nm),光纤光栅反射谱如图 3(b)所示。

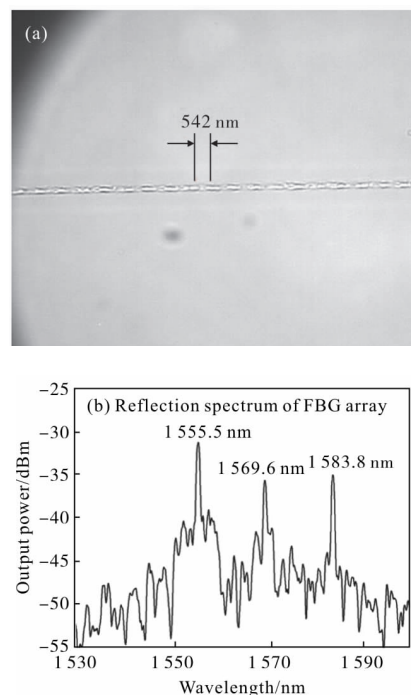


图 3 (a)刻写周期 542 nm 光栅影像图;(b)FBG 串反射光谱

Fig.3 (a) Grating image of 542 nm fabricating period;

(b) reflection spectrum of FBGs

接下来,将 FBG 阵列作为选频单元,按照如图 1 所示结构搭建掺铒光纤激光器。采用 976 nm 二极管(Oclaro Co.)作为泵浦源,WDM 工作波长为

976/1 550 nm,C 波段掺铒光纤 (Nufern Co. EDFC-980-HP)长度为 3 m,L 波段掺铒光纤(Nufern Co. EDFL-980-HP)长度为 10 m,光纤耦合器,WDM,以及 PC 均由 Lightcomm 公司生产;宽带反射镜端面镀有金属膜,用于提高激光器工作效率;实验中所采用的光纤器件尾纤尺寸为 9/125  $\mu\text{m}$ 。

激光器工作阈值为 35 mW,首先产生波长为 1 569.02 nm 的单波长激光。提高泵浦功率为 100 mW 时,1 569.02 nm 单波长激光稳定输出,此时对该波长激光光谱特性进行采集分析。如图 4 所示,输出激光边模抑制较好,激光 3 dB 线宽为 0.05 nm。实验中光谱仪采集分辨率为 0.02 nm(Yokogawa Co. AQ6370D)。

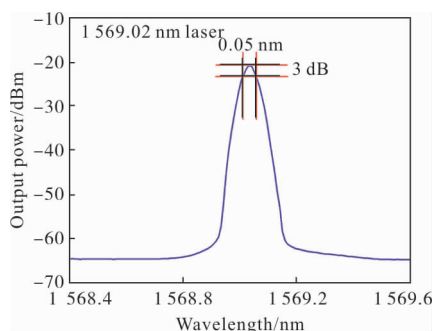


图 4 泵浦功率 100 mW 时 1 569.02 nm 激光光谱

Fig.4 Spectrum of 1 569.02 nm when pump power was 100 mW

保持泵浦功率为 100 mW,通过调节偏振控制器改变谐振腔内增益损耗,能够分别实现 1 583.2、1 569、1 555.4 nm 单波长激光可切换输出,其光谱如图 5(a)~5(c)所示,输出激光的边模抑制比均大于 35 dB,激光 3 dB 线宽小于 0.05 nm。

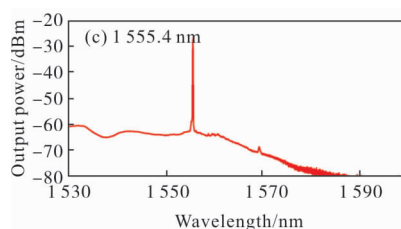
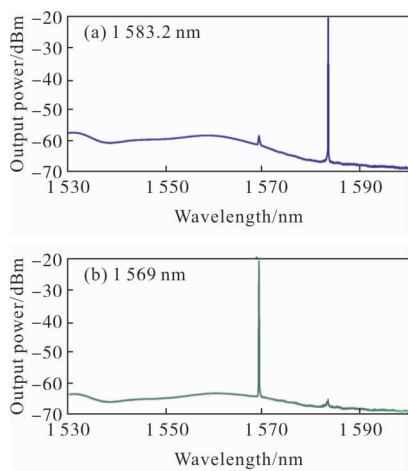


图 5 单波长激光可切换输出

Fig.5 Switchable single-wavelength laser output

在泵浦功率为 100 mW 条件下,通过调节偏振控制器能够在 C 波段及 L 波段实现双波长激光可切换输出。实验中,分别对双波长激光的光谱特性及稳定性进行测试与分析。当 1 569 nm 和 1 583.2 nm 双波长激光同时输出时,采集到的光谱如图 6(a)所示;通过调节 PC,激光器能够实现 1 555.4 nm 和 1 569 nm 双波长激光同时输出,其光谱如图 6(b)所示,激光信噪比大于 26 dB。

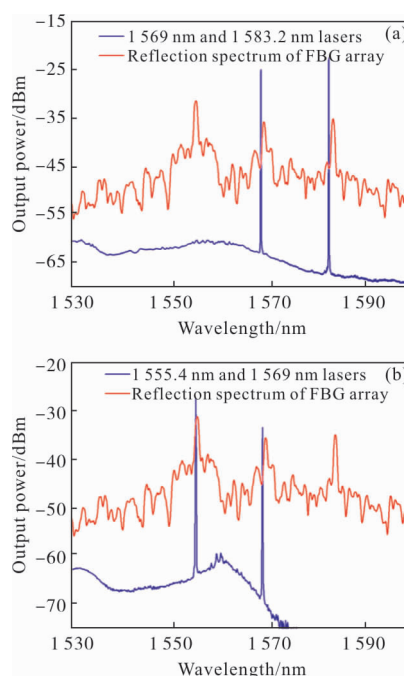


图 6 双波长激光可切换输出

Fig.6 Switchable dual-wavelength laser output

实验中在室温 26 $^{\circ}\text{C}$ 条件下分别对不同单波长激光输出的光谱稳定性进行测试,稳定性实验在恒温恒湿的超净间内完成。如图 7(a)~(c)所示,在 10 min 扫描时间内,每隔两分钟进行一次数据采集,1 555.4、1 569、1 583.2 nm 单波长激光光谱稳定性较好,采集过程中没有观察到明显的跳模以及功率跳变,其

功率波动分别为 0.98、0.35、0.37 dB。

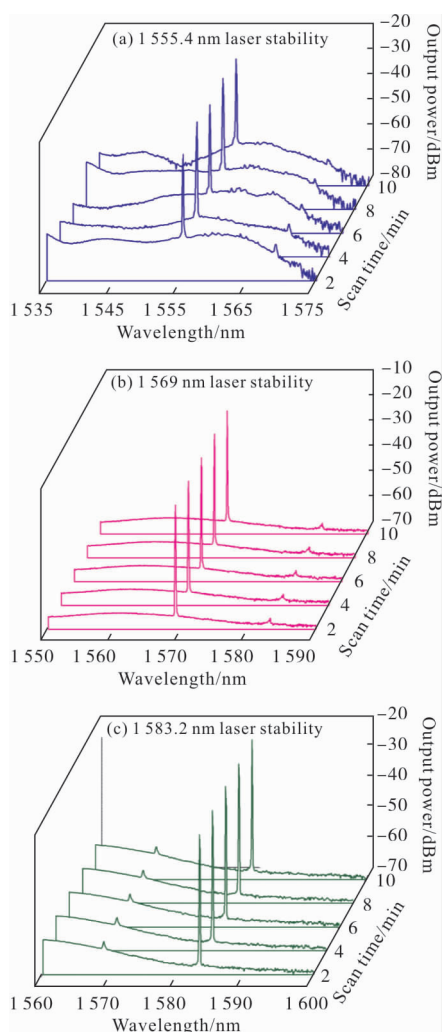


图 7 单波长激光光谱稳定性

Fig.7 Spectrum stability of single-wavelength laser

在相同测试条件下分别对两组不同波长的双波长激光光谱稳定性进行测试。1569、1583.2nm 双波长激光光谱稳定性如图 8(a)所示,1555.4、1569 nm 双波长激光光谱稳定性输出如图 8(b)所示。在 10 min 的

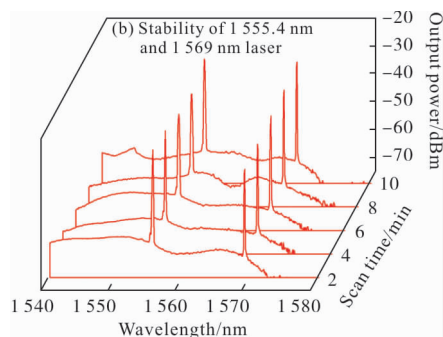
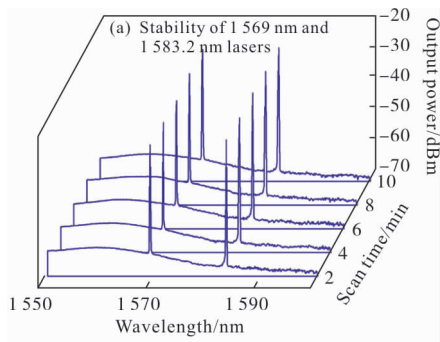


图 8 双波长激光光谱稳定性

Fig.8 Spectrum stability of dual-wavelength laser

监测过程中,没有观察到明显的模式跳变及功率波动,其功率变化分别为 1.14、0.93 dB 以及 4.31、4.48 dB。当激光器运转在双波长激光输出时,由于激光器存在模式竞争,因此其功率波动大于激光器工作在单波长运转状态。

通过对所设计 C+L 波段掺铒激光器的输出光谱特性、激光线宽和波长稳定性进行测试和分析,验证了基于飞秒激光直写制备 FBG 阵列实现单波长及双波长可切换激光输出的可行性和有效性,该方法抑制了激光光谱中的边模,提高了波长稳定性。

### 3 结 论

提出并分析了通过采用飞秒激光透过聚酰亚胺涂层直写技术制备 FBG 阵列的方法,实现反射波长 1555.5、1569.6、1583.8 nm 的 FBG 阵列制作,并将其作为 C+L 波段掺铒光纤激光器中的选频器件,实现单波长和双波长激光的可切换输出。激光器系统阈值为 35 mW,输出单波长激光分别为 1555.4、1569、1583.2 nm,边模抑制比大于 35 dB,激光 3 dB 线宽 0.05 nm,在 10 min 监测范围内,输出激光功率波动小于 0.98 dB,激光器稳定工作在单波长运转状态;当激光器工作在双波长激光输出时,边模抑制比大于 26 dB,输出激光功率变化分别小于 1.14 dB 和 4.48 dB。该光纤激光器具有结构紧凑、良好的输出光谱特性、输出波长稳定以及输出激光线宽窄的特点,在光纤传感以及光纤通信等领域具有一定的应用价值。

### 参 考 文 献:

[1] Chen Jiao, Tong Zhengrong, Zhang Weihua, et al. Temperature tunable multiwavelength fiber laser by using

- compounded filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0105001. (in Chinese)
- [2] Bianchetti M, Sierra-Hernandez J M, Mata-Chavez R I, et al. Switchable multi-wavelength laser based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer with non-zero dispersion-shifted fiber[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 104: 49-55.
- [3] Ahmad Harith, Jasim A A. Stable C-band fiber laser with switchable multi-wavelength output using coupled microfiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 105-114.
- [4] Han Jae-Ho. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with cascaded fiber Bragg gratings [J]. *Optik*, 2010, 141(24): 2266-2268.
- [5] Feng Suchun, Peng Jian, Peng Wanjin, et al. Single-polarization single-longitudinal mode erbium-doped fiber laser based on twisting of polarization-maintaining fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0102002. (in Chinese)
- [6] Zheng Shijie, Ghandehari Masoud, Ou Jinping. Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2016, 223: 324-332.
- [7] Liu Shuo, Yan Fengping, Tan Siyu, et al. Stability wavelength-spacing-tunable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(1): 125106.
- [8] Ding Zhenming, Wang Zhaokun, Zhao Chunliu, et al. Tunable erbium-doped fiber laser based on optical fiber Sagnac interference loop with angle shift spliced polarization maintaining fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 42: 1-5.
- [9] Wang Y P, Ju Y L, Wu C T, et al. Wavelength-tunable thulium-doped fiber laser by employing a self-made Fabry-Perot filter [J]. *Laser Physics*, 2017, 27: 065111.
- [10] Ding Xiangdong, He Wei, Yao Qifeng, et al. Switchable erbium-doped fiber laser utilizing tunable Mach-Zehnder filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005006. (in Chinese)
- [11] Liao Changrui, He Jun, Wang Yiping. Study on high temperature sensors based on Fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328009. (in Chinese)
- [12] Joe Habel, Tommy Boilard, Jean-Simon Freniere, et al. Femtosecond FBG written through the coating for sensing applications [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2519-2523.