

基于掺铒光纤重叠光栅的双波长光纤激光器

王 枫^{1,2} 毕卫红¹ 付兴虎¹ 江 鹏¹ 武 洋¹

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

²河北科技师范学院机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 基于增益均衡技术,提出了一种结构简单的双波长光纤激光器。激光器采用线形腔结构,以一对双波长掺铒光纤重叠光栅为波长选择器件,掺铒光纤为增益介质。实验结果表明,通过精细调节输出端双波长掺铒光纤重叠光栅两端的机械应力,能够调整出射端腔镜在 λ_1 和 λ_2 处的反射率(或透射率),即调整激光器的损耗,使谐振腔内双波长处各自的损耗和增益相匹配,有效抑制腔内模式竞争,实现了波长间隔为0.932 nm的稳定双波长激光同时激励。该激光器阈值功率为4 mW,输出激光的3 dB带宽约为0.02 nm,30 dB带宽小于0.2 nm,边模抑制比可达51.96 dB。激光器具有结构简单、室温下输出稳定、线宽窄、阈值低等优点。

关键词 激光器; 双波长光纤激光器; 重叠光栅; 掺铒光纤

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402002

Dual-Wavelength Fiber Laser Based on Er³⁺-Doped Superimposed Fiber Gratings

Wang Feng^{1,2} Bi Weihong¹ Fu Xinghu¹ Jiang Peng¹ Wu Yang¹

¹Hebei Provincial Key Laboratory of Special Fiber and Fiber Sensor, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²College of Mechanical Electrical and Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Based on gain homogeneity technology, a new type of dual-wavelength fiber laser is proposed and demonstrated. Linear cavity structure is used in the fiber laser, two Er³⁺-doped superimposed fiber gratings with reflectivity above 99% are used for wavelength selection, and Er³⁺-doped fiber is used as the gain medium. The experimental results show that precise adjustment of the mechanical stress at two ends of the superimposed fiber gratings can regulate the reflectivity (or transmissivity) of cavity lenses at the output end at wavelengths of λ_1 and λ_2 , i.e. regulate the laser loss, which makes the gain and loss at two wavelengths in the resonance cavity match well, inhibits mode competition in the resonance cavity, and achieves stable simultaneous dual-wavelength laser emission with wavelength interval of 0.932 nm. The threshold power of the proposed laser is 4 mW, the 3 dB band width is 0.02 nm, the 30 dB band width is less than 0.2 nm, and the side mode suppression ratio is 51.96 dB. This laser have such advantages as simple structure, stable output at room temperature, narrow band width and low threshold.

Key words lasers; dual-wavelength fiber laser; superimposed grating; Er³⁺-doped fiber

OCIS codes 140.3510; 060.2310; 060.2320; 060.2380; 060.3735

收稿日期: 2015-07-09; 收到修改稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475133,61575170)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划项目

作者简介: 王 枫(1980—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: wangfengwff@126.com

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与光电检测等方面的研究。

E-mail: whbi@whbi@ysu.edu.cn

1 引言

双波长光纤激光器因其在光纤通信、宽带无线接入、毫米波源、微波参考源、光纤传感、光学仪器测试^[1-4]等方面的广泛应用,吸引了研究者越来越多的关注。双波长光纤激光器在室温下能否稳定工作的主要影响因素是由增益介质的均匀展宽性质引起的模式竞争。研究者提出了多种抑制模式竞争的方法^[5-8],例如,Wang等^[9]在环形腔激光器内采用高消光比双通道马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪激射单纵模双波长激光,并用于产生3 dB带宽仅为10 kHz的微波信号,但是该激光器的输出功率比较小。Zhao等^[10]提出一种稳定的线形腔双波长光纤激光器,采用阵列波导光栅优化腔内损耗,在损耗较小的腔内插入可调光衰减器,从而输出稳定的双波长激光,波长可调范围为0.8~12.06 nm,但是该激光器结构较为复杂。Ahn等^[11]采用偏振相关表面长周期光栅设计了一种环形腔掺铒光纤激光器,输出波长可在C波段和L波段选择,但是其结构较为复杂。因此,研发一种结构简单、性能稳定的双波长光纤激光器就显得尤为必要。

光纤重叠光栅是一种特殊结构的光栅器件,在光纤同一位置写入多个光栅形成,具有长度小,波长间隔、反射率灵活,温度、应变响应一致等优点。另外,作为一种新颖的光纤激光器的波长选择器件,光纤重叠光栅可实现波长的快速准确选择,即具有节省空间、稳定性好等优点^[12]。基于此,本文提出了一种简单的基于掺铒光纤重叠光栅的双波长光纤激光器。该激光器采用线形腔结构,利用一对双波长掺铒光纤重叠光栅实现波长选择,全部器件均为非保偏器件。通过实验分析了该激光器输出光谱随抽运功率的变化规律、输出激光的稳定性以及输出功率随谐振腔腔长的变化规律。采用增益均衡技术,通过控制施加在掺铒光纤重叠光栅上的应力,调节激光腔内双波长处的增益与损耗,实现双波长的增益均衡和稳定激射。实验结果证明该激光器具有结构简单、阈值低、线宽窄等优点。

2 实验原理

2.1 实验装置

基于掺铒光纤重叠光栅的双波长光纤激光器实验装置如图1所示。图中,980 nm激光二极管(LD)半导体激光器的最大输出功率为750 mW。使用了一对光纤重叠光栅(SIFG),其中SIFG 2两侧装有应力调节装置。采用Nufern公司生产的EDFC-980-HP C-band光敏型掺铒光纤(EDF),工作波长为C波段,纤芯直径为3.2 μm ,包层直径为(125 \pm 1.0) μm ,纤芯铒离子掺杂浓度为0.15%(物质的量分数)。采用AQ6370C型光谱分析仪(OSA)测量输出光谱,最小波长分辨率0.02 nm。上述器件均为非保偏器件。

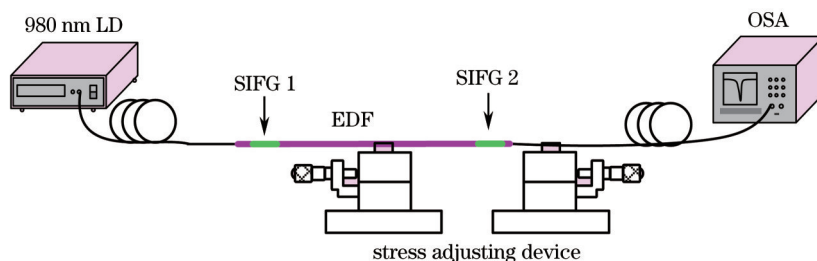


图1 双波长光纤激光器实验装置示意图

Fig.1 Sketch map of dual-wavelength fiber laser experimental device

2.2 掺铒光纤重叠光栅的光谱特性

实验中采用的EDFC-980-HP C-band光纤为光敏型掺铒光纤,在该光纤上分别刻写不同的重叠光栅即可得到图1中SIFG 1和SIFG 2,光栅栅长均为30 mm。SIFG 1的透射谱和反射谱如图2所示,由图2(a)可知,①处重叠光栅峰值反射率为99.990%,②处重叠光栅峰值反射率为99.998%,均高于99%;由图2(b)可知,①处重叠光栅峰值波长为1560.440 nm,3 dB带宽小于0.5 nm,②处重叠光栅峰值波长为1561.264 nm,3 dB带宽小于0.5 nm,两个光栅之间的波长间隔为0.824 nm,满足通信中纳米或亚纳米作为信道间隔单位的要求。

SIFG 2的透射谱和反射谱如图3所示。由图3(a)可知,①处重叠光栅峰值反射率为99.842%,②处重叠光栅峰值反射率为99.369%;由图3(b)可知,①处重叠光栅峰值波长为1560.484 nm,3 dB带宽小于0.4 nm,②处重叠光栅峰值波长为1561.432 nm,3 dB带宽小于0.4 nm,两个光栅之间的波长间隔为0.948 nm,同样满足

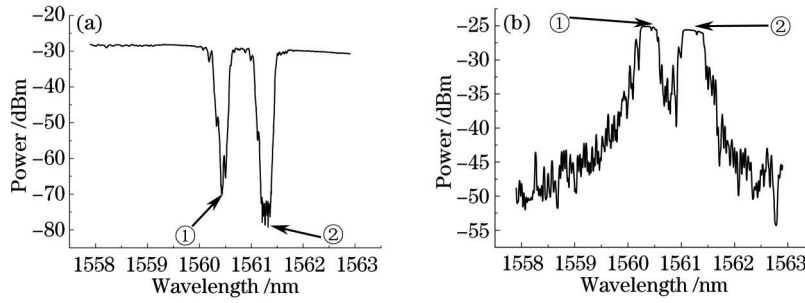


图2 SIFG 1的(a)透射谱和(b)反射谱

Fig.2 (a) Transmission spectrum and (b) reflectance spectrum of SIFG 1

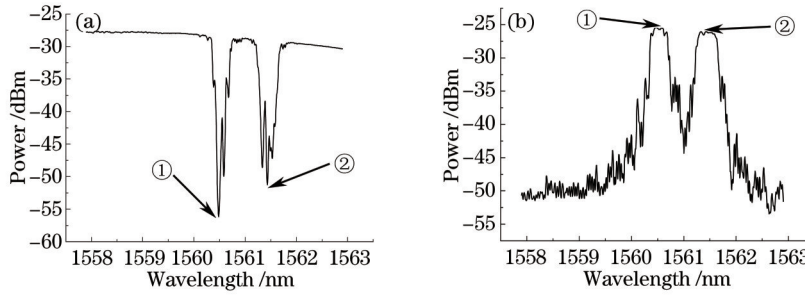


图3 SIFG 2的(a)透射谱和(b)反射谱

Fig.3 (a) Transmission spectrum and (b) reflectance spectrum of SIFG 2

通信中纳米或亚纳米作为信道间隔单位的要求。

SIFG 1和SIFG 2各自的双波长光栅之间的波长间隔并不相同,分别为0.824 nm和0.948 nm,但是通过精细调节输出端SIFG 2两端的机械应力,可以使谐振腔内双波长处各自的损耗和增益相匹配,从而抑制谐振腔内模式竞争,实现稳定的双波长激光同时激励。

2.3 实验原理

由图1可知,该双波长光纤激光器采用线形腔结构,其中增益介质为掺铒光纤,谐振腔由反射率高于99.99%的重叠光栅SIFG 1和反射率约为99.40%的重叠光栅SIFG 2组成。980 nm LD激励的抽运光经SIFG 1进入由SIFG 1和SIFG 2构成的谐振腔中,两束激光共用同一段掺铒光纤作为增益介质。

双波长光纤激光器的核心问题是解决掺铒光纤作为激光器的增益介质在室温下存在的模式竞争问题。随着谐振腔内两个波长 λ_1 和 λ_2 处信号光强逐步增加,因受激辐射,高能级上的反转粒子数减少,增益随之下降,导致整个频谱的增益曲线也随之下降,不会出现增益烧孔现象。徐攀等^[13]利用增益均衡法,采用经典的Giles模型对双波长激光器进行了建模,指出激光器两个模式的损耗和增益相等的同时还要满足

$$l_{\lambda_2} - l_{\lambda_1} = G_{\lambda_2} - G_{\lambda_1}, \quad (1)$$

$$l_{\lambda_1} = G_{\lambda_1}, \quad l_{\lambda_2} = G_{\lambda_2}, \quad (2)$$

才能在室温下获得稳定的双波长激光同时振荡。此时有

$$l_{\lambda_2} = l_{\lambda_1} + G_{\lambda_2} - G_{\lambda_1} = l_{\lambda_1} + \Delta G_{\lambda_1\lambda_2}, \quad (3)$$

式中 l_{λ_i} 和 G_{λ_i} 分别表示 λ_i 处的损耗和增益, $i=1,2$ 。

徐攀等^[14]进一步推导得出在上述双波长平衡振荡条件下损耗需要满足的方程:

$$l_2 = l_1 \frac{\alpha_2 + g_2}{\alpha_1 + g_1} + (10 \lg e) \frac{\alpha_2 + g_2}{\alpha_1 + g_1} \alpha_1 L - (10 \lg e) \alpha_2 L, \quad (4)$$

式中 α_k 、 g_k 和 L 分别表示吸收系数、增益系数和掺铒光纤长度,其中 $k=1,2$ 。

激光器的总损耗系数为

$$\alpha_{k_total} = \alpha_{inter} - \frac{1}{2L} \ln(r_{k1} r_{k2}), \quad (5)$$

式中 r_{k1} 、 r_{k2} 和 α_{inter} 分别表示SIFG 1的反射率、SIFG 2的反射率和内损耗系数。

因此,由(5)式可知,实验中通过调整谐振腔内SIFG 2两端的机械应力,调整出射端腔镜在 λ_1 和 λ_2 处的反射率 r_{k1} 、 r_{k2} (或透射率),即调整激光器的总损耗系数,使总损耗满足(4)式,并使两个波长 λ_1 和 λ_2 处各自的损耗和增益相匹配,从而达到抑制模式竞争的目的,最终在室温下获得稳定双波长激光同时输出。

当激光器两个模式各自的损耗和增益不相匹配时,将会出现某一个模式继续振荡,而另一个模式逐步湮灭的状态。此时仅有一个波长处有激光输出,不能实现双波长激光同时振荡。

3 实验结果及分析

3.1 不同抽运功率下的光谱变化规律

按照图1搭建光纤激光器系统,掺铒光纤长度取39 cm。当抽运光功率达到4 mW时,精细调节SIFG 2两端的机械应力,从输出端光谱仪观测到开始有激光输出,初始激光输出如图4所示。

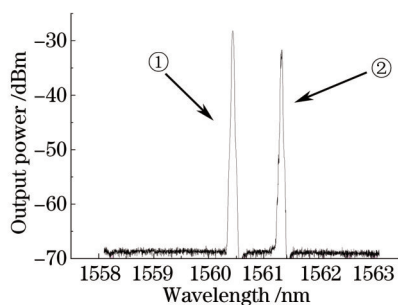


图4 抽运功率为4 mW时的输出光谱

Fig.4 Output power at 4 mW pump power

随着抽运光功率的增加,输出光功率逐渐增大,如图5所示。

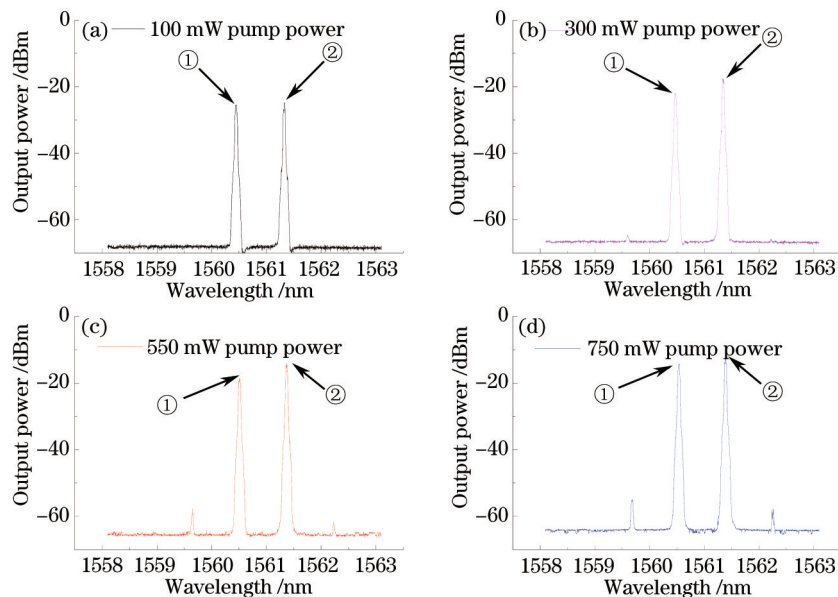


图5 不同抽运功率下的输出光谱

Fig.5 Output powers at different pump powers

图5是抽运功率分别为100、300、550、750 mW时的输出光谱。通过图5可以看出,随着抽运功率的增大,①处和②处的激光输出峰值光功率也不断增加,前者由-25.51 dBm增加至-14.34 dBm,后者由-24.77 dBm增加至-12.31 dBm。随着抽运功率的增加,输出激光的谐振波长波动很小,①处谐振波长波动最大值为0.074 nm,②处谐振波长波动最大值为0.062 nm。另外,随着抽运功率的增加,输出激光线宽较窄且基本上没有变化。受光谱仪分辨率的限制,①处和②处输出激光的3 dB带宽显示约为0.02 nm。若采用分辨率更小的光谱仪,显示的输出激光3 dB带宽将会更小。通过比较图5输出图谱还可以发现,随着抽运功率的增加,在①处和②处输出双波长激光的两侧出现了两个小峰,这是因为在其他波长处掺铒光纤中的铒离子被

激发到高能级,从而产生受激激发,导致两个小峰的出现。

随着抽运功率的增加,激光输出光功率的变化曲线如图6所示。

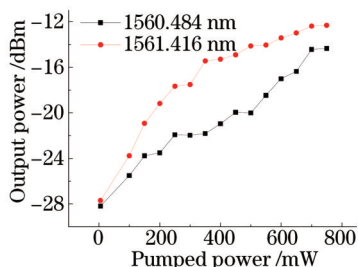


图6 输出光功率随抽运光功率的变化曲线

Fig.6 Curves of output power versus pump power

从图6可以看出,输出光功率随抽运光功率的增加几乎呈线性增加,但是1560.484 nm处的输出光功率不及1561.416 nm处的输出光功率随抽运光功率的变化速度快。这是因为虽然通过精细调整应力调节装置,使得1560.484 nm和1561.416 nm波长处基本上达到了增益均衡,掺铒光纤中铒离子粒子数反转在两波长处近似相等,出现了双波长激光同时激励,但是两个波长处还是会存在很少的模式竞争,其结果就是1561.416 nm处的输出光功率随抽运光功率的变化更快。

3.2 输出激光的稳定性

为了考察输出激光的长期稳定性,设定抽运功率为750 mW,以3 min为时间间隔对输出激光进行11次重复扫描,输出光谱如图7所示。

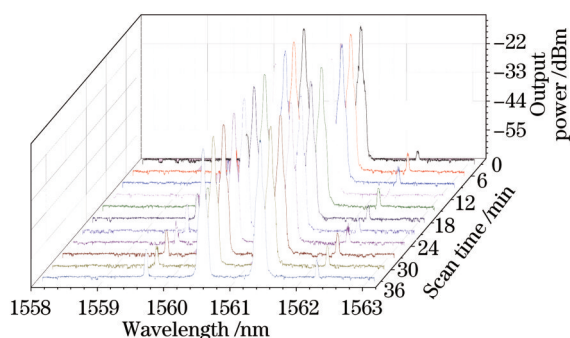


图7 750 mW 抽运功率激励下双波长激光的连续扫描光谱

Fig.7 Continuous scanning spectra of dual-wavelength laser at 750 mW pump power

图7中输出的双波长激光是室温(25℃)条件下在至少22 min的时间内进行重复扫描得到的,输出双波长激光的3 dB带宽约为0.02 nm,30 dB带宽小于0.2 nm。观察发现输出光谱波形的稳定性很好,计算得到输出双波长的边模抑制比为51.96 dB。为了更好地观测输出激光的稳定性,绘制其峰值功率(图8)和中心波长(图9)随扫描次数的变化曲线。

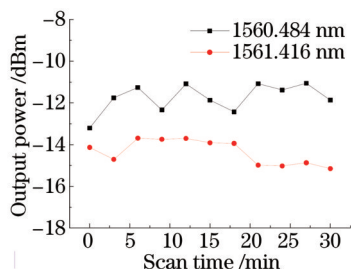


图8 750 mW 抽运功率激励下连续输出激光峰值功率波动曲线

Fig.8 Peak power fluctuation curves of continuous output laser at 750 mW pump power

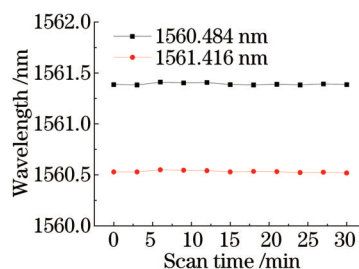


图9 750 mW 抽运功率激励下连续输出激光中心波长波动曲线

Fig.9 Central wavelength fluctuation curves of continuous output laser at 750 mW pump power

从图8和图9可以看出,输出激光1560.484 nm处的波长漂移最大值为0.032 nm,1561.416 nm处的波长漂移最大值为0.02 nm;1560.484 nm处的峰值功率变化最大值为1.462 dBm,1561.416 nm处的峰值功率变化最大值为2.145 dBm。以上数据说明在室温下该双波长光纤激光器输出光的功率和中心波长波动很小,具有很好的稳定性。

3.3 输出激光随谐振腔长的变化规律

将掺铒光纤长度由39 cm改为72 cm,仍然按照图1搭建激光器系统,绘制抽运功率均为70 mW时不同掺铒光纤长度激光器的输出光谱,如图10所示。

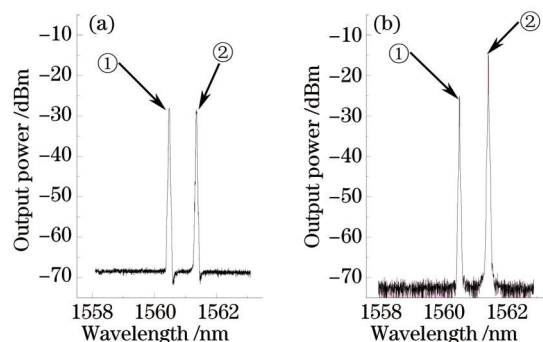


图10 70 mW抽运功率下不同掺铒光纤长度激光器的输出光谱。(a) 39 cm; (b) 72 cm

Fig.10 Output spectra of lasers with different Er³⁺-doped fiber lengths at 70 mW pump power. (a) 39 cm; (b) 72 cm

实验结果显示,随着掺铒光纤长度的增加,阈值功率增大,掺铒光纤长度为39 cm时阈值功率为5 mW,掺铒光纤长度为72 cm时阈值功率为8 mW。随着掺铒光纤长度的增加,激光器更易出现跳模现象,掺铒光纤长度为39 cm时,受限于最大输出功率条件,激光器并未测到跳模现象;而当掺铒光纤长度为72 cm时,抽运功率高于97 mW后出现跳模现象,这是因为随着掺铒光纤长度的增加,谐振腔内更多的铒离子被激发到高能级,更多波长上的铒离子参与模式竞争,从而出现模式跳变。在相同的抽运功率条件下,随着掺铒光纤长度的增加,输出激光功率增大。从图10可以看到,当抽运功率均为70 mW时,掺铒光纤长度取39 cm时①处峰值功率为-28.061 dBm,②处峰值功率为-28.378 dBm;掺铒光纤长度取72 cm时①处峰值功率为-25.072 dBm,②处峰值功率为-14.701 dBm。实验可以选用掺杂浓度更高的掺铒光纤以提高激光器的出射功率。另外,采用压电陶瓷代替机械调节装置,可以大大缩小激光器的体积,便于集成。

4 结 论

提出了一种基于一对双波长掺铒光纤重叠光栅的线形腔双波长光纤激光器,使用峰值反射率均高于99%的掺铒光纤重叠光栅作为波长选择器件构成谐振腔,掺铒光纤为增益介质。实验表明,通过精细调节SIFG 2两端的机械应力,能够调整出射端腔镜在 λ_1 和 λ_2 处的反射率(或透射率),即调整激光器的损耗,使得谐振腔内双波长处各自的损耗和增益相匹配,抑制模式竞争。室温下得到了稳定的1560.484 nm和1561.416 nm双波长激光输出,其3 dB带宽约为0.02 nm,30 dB带宽也小于0.2 nm,输出激光的边模抑制比为51.96 dB,波长漂移最大值为0.032 nm,峰值功率变化最大值为2.145 dBm。结果表明提出的双波长光纤激光器具有结构简单、室温下输出稳定、线宽窄、阈值低等优点。

参 考 文 献

- 1 Peng P C, Lee W Y, Wu S S, *et al.*. Multiwavelength fiber laser for the fiber link monitoring system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 51(10): 62-66.
- 2 Jia Qingsong, Wang Tianshu, Zhang Peng. Microwave signal generation based on dual-wavelength Brillouin fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0705001.
- 贾青松, 王天枢, 张 鹏. 基于双波长布里渊光纤激光器的微波信号产生[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0705001.
- 3 Guo K K, Lou X T, Yan C S, *et al.*. Gas-self-filter-based erbium-doped fiber loop laser for gas detection[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4811-4816.

- 4 Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.*. High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728006.
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0728006.
- 5 Maran J N, La Rochelle S, Besnard P. C-band multi-wavelength frequency-shifted erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2003, 218: 81-86.
- 6 Zou H, Lou S Q, Yin G L. A wavelength-tunable fiber laser based on a twin-core fiber comb filter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 629-633.
- 7 Moon D S, Chung Y. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser assisted with four-wave mixing of dispersion-shifted fiber[J]. *Optics Communications*, 2013, 286: 239-243.
- 8 Zheng W J, Ruan S C, Zhang M, *et al.*. Switchable multi-wavelength erbium-doped photonic crystal fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 50(2): 145-149.
- 9 Wang F, Xu E M, Dong J J, *et al.*. A tunable and switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber laser incorporating a reconfigurable dual-pass Mach-Zehnder interferometer and its application in microwave generation[J]. *Optics Communications*, 2011, 284: 2337-2340.
- 10 Zhao J F, Liao T Q, Zhang C, *et al.*. A Switchable linear cavity dual-wavelength fiber laser with equalized output by optimizing intracavity loss[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(12): 1092-1094.
- 11 Ahn S, Kim H J, Han Y G. Switchable dual wavelength erbium-doped fiber laser in C- and L-band[C]. *Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2013: 1-2.
- 12 Ma Y C, Liu H Y, Yan S B, *et al.*. Additive non-uniform random sampling in superimposed fiber Bragg grating strain gauge[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5): 055201.
- 13 Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina, *et al.*. Modeling of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser and simulation of mode competition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 74-78.
徐 攀, 胡正良, 马丽娜, 等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器建模及模式竞争的仿真[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 74-78.
- 14 Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina, *et al.*. Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1347-1351.
徐 攀, 胡正良, 马丽娜, 等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1347-1351.

栏目编辑: 宋梅梅