

# 基于高精度度光纤滤波器的双波长光纤激光器

杨秀峰 魏芳芳 童峥嵘 潘洪刚

(天津理工大学计算机与通信工程学院智能计算及软件新技术重点实验室及薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 提出了基于高精度度光纤环形滤波器的双波长窄线宽光纤激光器结构。在单波长光纤激光器的基础上, 增加保偏光纤布拉格光栅(PM-FBG)和高精度度的光纤滤波器。其中保偏光纤布拉格光栅作为激光器的波长选择元件, 可产生两个波长的激光输出。高精度度的光纤滤波器由两个光耦合器和一段弱抽运的掺铒光纤构成, 掺铒光纤产生的增益和光纤时延使滤波器具有梳状谱响应和高精度度, 从而抑制激光器产生的不需要的模式, 保证输出激光具有窄线宽特性。以 980 nm 的激光二极管(LD)作为抽运源, 得到了室温下单峰最大输出功率 5.27 mW 和 1.02 mW, 波长间隔为 0.16~0.32 nm 可调谐的双波长窄线宽连续激光输出。

**关键词** 激光器; 双波长光纤激光器; 光纤滤波器; 高精度度

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402010

## Dual-Wavelength Fiber Laser Based on a High Finesse Fiber Ring Filter

Yang Xiufeng Wei Fangfang Tong Zhengrong Pan Honggang

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices and Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** A dual-wavelength fiber laser with a narrow bandwidth, based on a high finesse fiber ring filter has been proposed. Polarization-maintaining fiber Bragg grating(PM-FBG) and a high finesse fiber ring filter are introduced based on the traditional fiber laser. PM-FBG is used as the wavelength selection device to produce dual-wavelength. The fiber ring filter consists of two optical couplers and a section of weak pumped erbium-doped fiber(EDF). Because of the delay of cavity length and the gain generated by the EDF, the filter has spectral response with a high finesse. The incorporation of the fiber ring filter leads to the suppression of undesirable mode and makes the output laser narrow bandwidth. Under 980 nm LD pumped, the maximum outputs of the two wavelengths are 5.27 mW and 1.02 mW, respectively, at the room temperature. And the wavelength spaces of the two wavelengths are tunable within the range between 0.16 nm and 0.32 nm.

**Key words** lasers; dual-wavelength fiber laser; fiber filter; high finesse

**OCIS codes** 140.3560; 060.3510; 140.3500

## 1 引 言

光纤激光器相对于半导体激光器具有线宽窄、频率稳定、体积小、散热性好等诸多优点, 可以应用在光纤传感、相干光通信、激光雷达、非线性光学和高精度光谱测量等方面。可调谐双波长光纤激光器可用于波分复用光通信系统、光谱测量、光纤传感等领域<sup>[1~5]</sup>。特别是, 对双波长激光信号经过相干检测所得的拍频信号可作为射频微波信号, 不需要高

品质的微波参考源, 因此, 双波长光纤激光器还可应用于微波和毫米波信号的产生。

目前已经有几种不同机理的多波长激光器。2000 年, 加拿大的 A. Bellemare 等<sup>[6]</sup>提出在环形腔中引入频移器, 获得常温下稳定的多波长掺铒光纤激光输出。2005 年, 孙国勇等<sup>[7]</sup>利用正弦相位调制器取代频移器, 同样实现了多波长激光输出。但是这两种方法容易形成单个或几个波长的短脉冲输

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2010-11-17

基金项目: 天津市自然科学基金(08JCYBJC14400)资助课题。

作者简介: 杨秀峰(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事慢光、光纤激光器和光传感技术等方面的研究。

E-mail: yangxfbee@163.com

出。为了保证多波长连续激光输出,必须精细控制环形腔的腔内损耗、功率以及掺铒光纤的饱和度。2010年张祖兴等<sup>[8]</sup>提出利用布里渊散射获得多波长激光输出,但是这种方法结构复杂,稳定性不高。目前国内外的光纤激光器<sup>[2,8~15]</sup>主要针对多波长输出,结构复杂,室温下稳定性差,相应的成本较高。为此本文提出了一种基于高精度度光纤滤波器的双波长激光器,这种结构完全由光纤组成,结构简单,造价低,产生的双波长恰好满足做拍频产生微波信号,且在室温下可以稳定输出窄线宽双波长激光。所设计的双波长激光器采用全光纤环形腔结构,保偏光纤布拉格光栅作为谐振腔的选频元件,产生双波长。为保证激光器输出具有窄线宽特性,实验中引入了一种具有高精度度的光纤环形滤波器。该滤波器的传输函数具有梳状谱特性。实验实现了双峰功率分别为 1.02 mW 和 5.27 mW 的输出激光。中心波长分别为 1541.24 nm 和 1541.58 nm,通过调整偏振控制器波片的位置及相对夹角,可得波长间隔在 0.16~0.32 nm 之间可调谐的激光信号,两个波长的拍频信号可以应用于微波信号的产生。

## 2 实验结构和原理

图 1 为基于高精度度光纤滤波器的双波长激光器结构图。实验中 980 nm 的激光二极管(LD)通过波分复用器(WDM)和 2×2 的 3 dB 耦合器(coupler 1)同时抽运掺铒光纤(EDF1 和 EDF2)。长为 5.3 m 的 EDF2 作为增益介质。为了确保环中的光单向运转,在系统中引入了隔离器(ISO)。保偏光纤布拉格光栅(PM-FBG)作为选频元件,产生两个谐振波长,2×2 的 3 dB 耦合器(coupler 1)经过 WDM 将光信号引出,用光谱仪测量。0.5 m 长的 EDF1 和耦合器 1 以及一个 30:70 的 1×2 耦合器(coupler 2)连接成环(腔长约 1 m)构成滤波器,

对谐振波长进行滤波,滤波后 70% 的光进入激光器谐振腔。

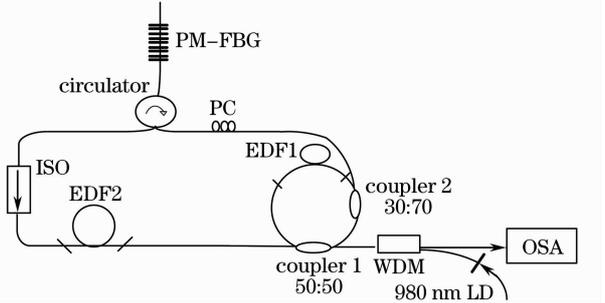


图 1 基于高精度度环形光纤滤波器的双波长激光器  
Fig. 1 Schematic of dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser based on a high finesse ring fiber

该激光器的工作原理是由抽运源注入的抽运光抽运 EDF2 得到增益,由光耦合器输出到 PM-FBG,满足布拉格波长的光被反射回环中继续振荡,同时每循环一次经光纤环形滤波器滤除不需要的模式,经过多次循环振荡后形成谐振,产生的激光经 WDM 输出到光谱仪(OSA)观测结果,只有满足波长在布拉格中心波长处的谐振频率才有持续稳定的激光输出。调整偏振控制器(PC)可以调谐保偏光栅两个反射峰的功率,进行能量的分配,调节两波长的峰值功率差,使双波长激光稳定输出。

实验中采用 PM-FBG 作为激光器的波长选择元件,对应有两个偏振方向的两个波长的反射峰,结合 PC,可以调节两个波长的反射率。图 2 为 PM-FBG 的透射谱。图 2(a)中两个布拉格中心波长分别为: $\lambda_1=1541.39$  nm, $\lambda_2=1541.49$  nm,3 dB 带宽分别为 0.09 nm 和 0.17 nm。反射率分别为: $R_1=10.88$  dB, $R_2=14.08$  dB。对应两个布拉格中心波长的反射率相差比较大,带来的结果是产生的双波长的峰值功率相差很大,在实验中通过调谐 PC 来控制两个谐振波长的功率。

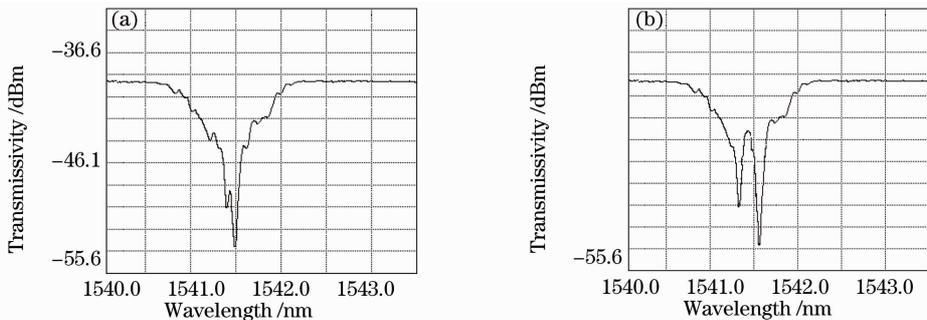


图 2 PM-FBG 的透射谱

Fig. 2 Schematic of transmission spectra of PM-FBG

图 2(b)为调节 PC 波片夹角后 PM-FBG 的透射谱,中心波长变化为  $\lambda_1 = 1541.25 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1541.56 \text{ nm}$ ,且波长间隔发生了变化。这是由于 PC 改变了光的偏振态,从而导致波长和反射率发生变化。

光纤环形激光器的腔长较长(实验中所用为 9 m),导致在中心振荡模式周围会产生数量很多密集间隔的纵模。根据激光器谐振腔长度与纵模间隔的关系 $[\Delta\nu \approx c/(2nL), n$ 取 1.446]可以近似推算出纵模频率间隔为 11.526 MHz,为了减少边模的产生,限制输出激光的线宽,实验引入了一个具有高精度的环形光纤滤波器。环形滤波器的基本原理是进入滤波器的光经过耦合器和 EDF1 后产生了延时和增益。滤波器的频率响应具有梳状谱特点,且具有高精度,它可以有效地限制两个传输峰中不需要的模式,其结构如图 3 所示。3 dB 光耦合器对于 1550 nm 波长光的分光比为 50:50,对于 980 nm 波长光的分光比为 10:90,此时有 10%的抽运功率注入环中。

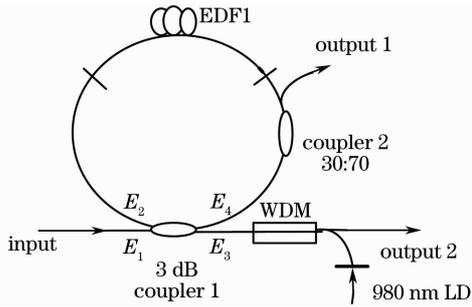


图 3 高精度环形光纤滤波器结构图

Fig. 3 Schematic of high finesse fiber ring fiber

下面讨论环形滤波器的数学模型。输入的光波场由  $E_1$  和  $E_2$  表示,输入光注入  $2 \times 2$  的光耦合器(coupler 1),两个输出端口的光可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-r} & i\sqrt{r} \\ i\sqrt{r} & \sqrt{1-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $r$  为耦合器的耦合因子,这里  $r=0.5$ 。环形滤波器中的光波场  $E_4$  为

$$E_4 = i\sqrt{r}E_1 + \sqrt{1-r}E_2. \quad (2)$$

激光器谐振腔中的激光由图 3 中  $E_1$  端口进入滤波器,经过 EDF1 得到一个弱的增益  $g$ ,一个很小的时延  $\tau$ ,然后由  $E_2$  端口送入耦合器由  $E_4$  端口经过  $1 \times 2$  耦合器 70% 输出到激光器中。用公式表示为

$$E_2 = g \exp(j\omega\tau) E_4, \quad (3)$$

式中  $\omega$  是光波场的角频率。经过进一步的推导运

算<sup>[5]</sup>,可以得到滤波器 output 1 的传输函数  $T$

$$T = \frac{|E_4|^2}{|E_1|^2} = \frac{r}{1 + g^2(1-r) - 2g\sqrt{1-r}\cos(\omega\tau)}. \quad (4)$$

实验中环形滤波器的腔长为 1 m。自由光谱范围为 207.47 MHz。调谐滤波器的腔长可改变其自由频谱范围。自由频谱范围与滤波器的时延  $\tau$  的关系为

$$f_{\text{FSR}} = \frac{1}{\tau}. \quad (5)$$

根据  $f_{\text{FSR}}$  可计算出时延  $\tau$ ,进而根据光纤中的折射率( $n$ 取 1.446)可计算滤波器的腔长  $L$

$$L = v\tau = \frac{c}{n}\tau = \frac{c}{n} \frac{1}{f_{\text{FSR}}}, \quad (6)$$

式中  $v$  代表光纤中光的传播速度, $c$  表示真空中的光速。根据已选择的参数,可以仿真得到环形滤波器的传输函数谱形,如图 4 所示。

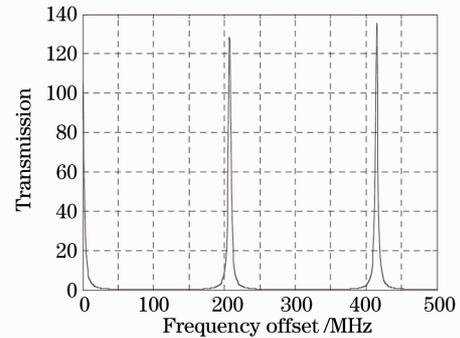


图 4 环形光纤滤波器的传输函数频谱

Fig. 4 Transmission of the high finesse ring filter

精细度  $N$  用来表征条纹的锐度,是衡量滤波器性能的重要指标,精细度指相邻 2 条纹之间的间隔与 1 个条纹频谱宽度之比。可表示为

$$N = \frac{f_{\text{FSR}}}{\Delta f}. \quad (7)$$

通过计算可知滤波器的精细度与钕纤增益以及耦合器的耦合比有关。图 5 为滤波器的精细度与耦合器的耦合比以及钕纤增益的关系曲线。当耦合器的耦合比一定时,随着钕纤有效增益  $g$  的增加,滤波器的精细度将会增加。当钕纤增益  $g$  固定,耦合因子从 0.6 减小到 0.4 时,滤波器精细度的曲线上移,这意味着有更高的功率被反馈到光纤环上。

由滤波器的传输函数可以导出 3 dB 带宽为

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau} \arccos \left[ \frac{4g\sqrt{1-r} - 1 - g^2(1-r)}{2g\sqrt{1-r}} \right]. \quad (8)$$

通过调谐滤波器的腔长,可以改变时延,从而达

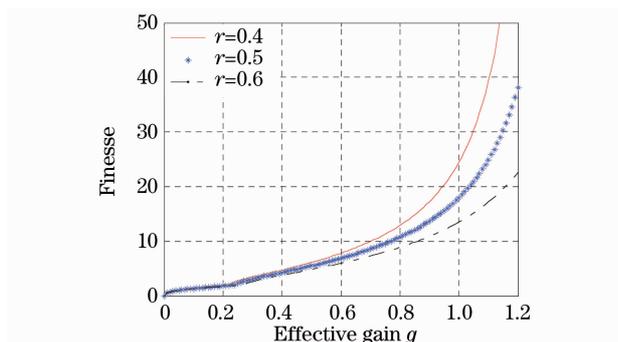


图 5 环形滤波器的精细度和有效增益  $g$  的关系曲线

Fig. 5 Finesse versus effective gain in the ring filter

到改变滤波器的 3 dB 带宽的目的。实验中滤波器腔长 1 m, 由 Matlab 计算得时延  $\tau = 0.048$  ps,  $f_{\text{FSR}} = 207.47$  MHz。由此计算得滤波器 3 dB 带宽为 10.8716 MHz。通过比较滤波器带宽和激光器纵模频率间隔的数据可知滤波器的 3 dB 带宽小于激光器的纵模间隔(11.526 MHz), 因此可实现窄线宽输出。受到光谱仪分辨率的限制(实验中所用 Anritsu MS9710B 的波长分辨率为 0.07 nm), 在光域内将很难检测到该滤波器的传输谱, 因此通过对比滤波前后的激光器输出光谱来验证滤波器的滤波效果。

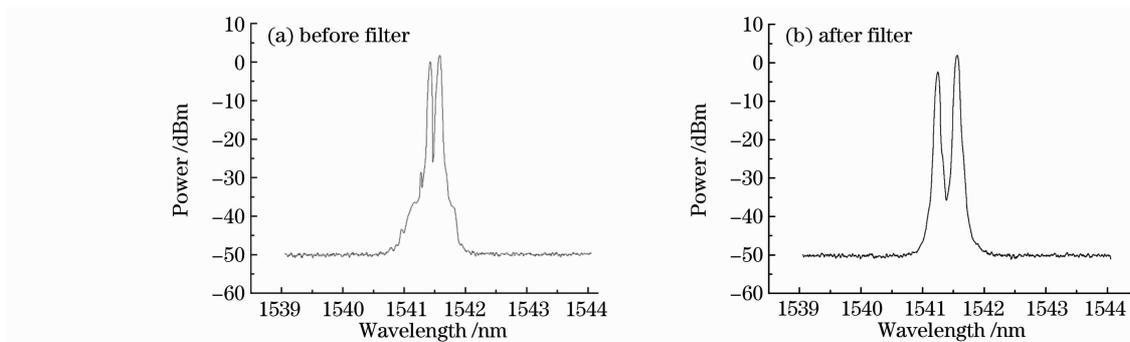


图 6 光谱仪观测到的激光器输出

Fig. 6 Optical spectra measured at output of spectrometer

由于 PM-FBG 的谐振波长不仅在波长上是分开的, 而且在偏振方向上也是相互垂直的, 因此, 当被用作选频元件时, 由于会引入较强的偏振烧孔效应, 调整偏振控制器的波片方位及夹角, 就可以灵活实现对波长峰值功率的调谐, 但是仍然不影响双波长激光作差频来产生微波信号。此时滤波器的  $f_{\text{FSR}}$  就应该随激光波长间隔变化而做调整, 对滤波器的腔长进行优化, 可以观测到滤波前后双波长激光的质量明显提高。通过调节 PC, 可以调谐两波长的峰值功率, 两功率是此消彼长的关系。对保偏光栅施

### 3 实验结果

图 6 为光谱仪测量的环形激光器输出光谱结果。图 6(a) 为无环形滤波器的激光器直接输出, 图 6(b) 为加入滤波器以后光谱仪测量的激光器输出。

可以观测到, 无环形滤波器时, 在两个中心振荡波长输出激光的线宽比较大(分别为 0.09 nm 和 0.16 nm), 周围存在许多边模。加滤波器之后, 抑制掉了不需要的边模, 两个波长的线宽变窄(分别为 0.08 nm 和 0.11 nm)。保持偏振控制器两  $\lambda/4$  波片方位不变, 调节中间  $\lambda/2$  波片的相对角度, 可以观测到两个峰的波长间隔在 0.16~0.32 nm 的范围内发生变化。精确调谐偏振控制器的波片夹角, 就可以控制双波长激光器的波长间隔。这是由于保偏光栅具有偏振相关损耗, 调节波片角度, 使得光栅在反射带宽内不同模的损耗发生变化; 在某一偏振态下, 在光纤光栅反射谱内只有损耗最小的模才能形成谐振, 激射特定波长的光<sup>[12]</sup>。在光纤光栅的带宽内可以容纳多个纵模, 激光模式在偏振方向上存在竞争, 调节偏振控制器, 调节了腔内波长的偏振态, 使得布拉格中心波长发生了轻微的偏移, 但是偏移量在 PM-FBG 的带宽范围之内。

加横向应力和纵向应力, 以及精确调谐 PC 的波片方位及夹角则可以调谐两波长的间隔, 从而实现产生的微波信号波长的可调谐。

实验证明输入抽运功率的大小对激光器输出功率有影响。当抽运功率为 5 mW 时, 激光器开始产生激光。随着抽运功率增大, 输出激光的强度增加, 当抽运功率等于 20 mW 时达 0 dBm, 双波长稳定输出。当抽运功率达到 80 mW 时, 最大激光功率 7.224 dBm(3 dB 带宽 0.08 nm) 和 4.496 dBm(3 dB 带宽 0.11 nm)。图 7 为 2.5 h 扫描的波形, 扫描间

隔为 30 min 的多波长输出。

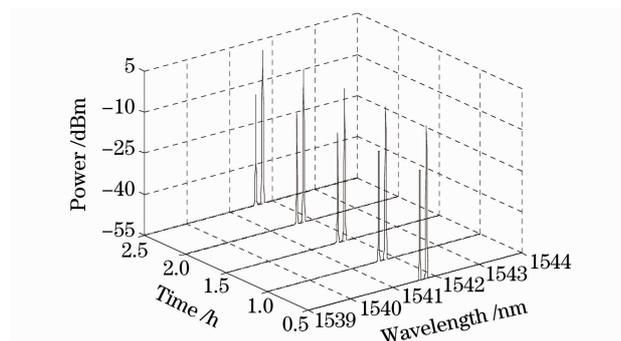


图 7 2.5 h 内激光器的双波长输出

Fig. 7 Optical spectra measured at 2.5 h period

滤波器的引入,抑制了不需要的纵模,实现了窄线宽双波长激光输出,并且使输出激光的稳定性增强。在 2.5 h 观测时间内,在光谱仪分辨率 0.07 nm 的精度内,峰值功率和中心波长变化小于 0.9 dB。滤波器的接入略微提高了激光器的阈值,抽运功率 7 mW 时产生激光。

## 4 结 论

提出了一个基于高精度环形光纤滤波器的双波长光纤激光器。产生的双波长激光双峰功率分别为 1.02 mW 和 5.27 mW,波长间隔从 0.16~0.32 nm 可调谐的双波长窄线宽连续激光,经过拍频后可用于产生微波信号。这个激光器结构的关键装置是高精度光纤滤波器,它由一段弱抽运的掺铒光纤结合两个光耦合器组成。通过分析证实,当铒纤产生的有效增益在 0~1.2 之间时,环形滤波器的精细度单调增加,很好地抑制了不需要的纵模,使输出激光具有窄线宽特性。通过理论计算和实验,对滤波器的各参数选择给出了定量计算。这种滤波器结构简单,具有严格稳定的梳状谱,其精细度较普通的滤波器高十几到几十倍,不仅可以应用在双波长激光器,还可以应用于多波长激光器,以及其他需要高精度滤波的结构中。

## 参 考 文 献

- 1 J. L. Zhou, L. Xia, X. P. Cheng *et al.*. Photonic generation of tunable microwave signals by beating a dual-wavelength single longitudinal mode fiber ring laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(1): 99~103
- 2 Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun *et al.*. Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2272~2276

- 徐慧文, 杨 华, 文双春 等. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2272~2276
- 3 S. L. Pan, J. P. Yao. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5414~5419
- 4 C. H. Yeh, T. T. Huang, H. C. Chien *et al.*. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 382~386
- 5 S. L. Pan, J. P. Yao. Frequency-switchable microwave generation based on a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser incorporating a high-finesse ring filter [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 12167~12173
- 6 A. Bellemare, M. Karasek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 825~831
- 7 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Yang Jing *et al.*. Study on stable multi-wavelength erbium-doped fiber at room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 821~824
- 孙国勇, 瞿荣辉, 杨 敬 等. 室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 821~824
- 8 Zhang Zuxing, Dai Guoxing, Kuang Qingqiang. Spacing adjustable multiwavelength fiber laser based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 815~819
- 张祖兴, 戴国星, 况庆强 等. 基于受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 815~819
- 9 X. P. Cheng, P. Shum, C. H. Tse *et al.*. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser ring laser based on high finesse fiber grating Fabry-Perot etalon [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 976~978
- 10 Hu Zongfu, Wang Hao. Multi-wavelength laser generated by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 833~838
- 胡宗福, 王 浩. 有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 833~838
- 11 Liu Yang, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894
- 刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定的多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- 12 Chi Ronghua, Lü Kecheng, Chen Shengping *et al.*. Research on lasing wavelength of fiber grating laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1315~1319
- 迟荣华, 吕可诚, 陈胜平等. 光纤光栅激光器激射波长的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1315~1319
- 13 X. X. Yang, L. Zhan, Q. S. Shen *et al.*. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Perot resonator and a saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11): 879~881
- 14 S. L. Pan, C. Y. Lou, Y. Z. Gao. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on inhomogeneous loss mechanism by use of a highly nonlinear fiber and a Fabry-Perot filter [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1113~1118
- 15 J. Liu, J. P. Yao, T. H. Yeap. Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1020~1022