

文章编号: 0258-7025(2007)11-1502-05

采用半导体光放大器的多波长 光纤环形激光器

王 华, 姚敏玉, 张洪明, 周炳琨

(清华大学电子工程系集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要 报道了一种插入马赫-曾德尔(M-Z)光纤干涉仪的半导体光放大器(SOA)多波长光纤环形激光器, 实现了信道间隔为100 GHz的稳定的多波长连续光激光, 其输出光谱3 dB带宽为19.5 nm, 消光比大于30 dB。其中在17.9 nm范围内获得了22个波长的连续光, 功率不平坦度为1.2 dB, 总输出功率为5.1 dBm。对该结构的多波长激光器输出光谱宽, 不同波长间功率波动小的特性进行了分析, 提出在较低环腔损耗下, 半导体光放大器的增益饱和及四波混频(FWM)效应的共同作用使环腔内多波长光功率获得自动均衡; 并对实验观测到的激光器输出光谱带宽及中心波长随半导体光放大器驱动电流降低或环腔损耗增大而减小的现象进行了讨论。

关键词 激光技术; 多波长激光器; 半导体光放大器; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Multi-Wavelength Fiber Ring Laser with Semiconductor Optical Amplifier

WANG Hua, YAO Min-yu, ZHANG Hong-ming, ZHOU Bing-kun

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A semiconductor optical amplifier (SOA) multi-wavelength fiber ring laser with a Mach-Zehnder (M-Z) fiber interferometer was reported and stable multi-wavelength continuous-wave lasing oscillations with channel spacing of 100 GHz are achieved with the 3 dB spectral bandwidth of 19.5 nm and signal-to-noise ratio higher than 30 dB. It is observed that the output power variation of the 22 wavelengths in 17.9 nm is 1.2 dB and total output power is 5.1 dBm. The wide spectrum and low output power variation acquired in this laser are attributed to the self-averaging of multi-wavelength optical power induced by gain saturation and four-wave mixing (FWM) in SOA under the low cavity loss condition. The decrease of the spectral bandwidth and center wavelength with the decrease of driving current of SOA or the increase of cavity loss observed in the experiment was also discussed.

Key words laser technique; multi-wavelength laser; semiconductor optical amplifier; Mach-Zehnder interferometer

1 引言

随着大容量光通信网络的发展, 波分复用(WDM)技术获得了广泛的应用。近年来, 多波长光纤激光器不仅成为波分复用系统的重要光源, 还广泛地应用于光传感、光采样和光学测量等领域, 引

起了国内外的广泛关注。实现多波长光纤激光器的方案有超连续谱滤波^[1]、拉曼光纤激光器^[2]、掺铒光纤(EDF)激光器^[3~5]和半导体光放大器(SOA)光纤激光器等多种。已有的实验研究^[6~8]证明, 与掺铒光纤为增益介质的光纤激光器相比, 在常温下, 半导

收稿日期: 2007-04-12; 收到修改稿日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60477021)资助项目。

作者简介: 王 华(1979—), 女, 回族, 河北人, 博士研究生, 目前研究方向为光纤激光器、全光时钟提取等。

E-mail: wangh01@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 姚敏玉(1946—), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为超快光子学、光时分复用和光采样与量化等。

E-mail: yaomy@mail. tsinghua. edu. cn

体光放大器光纤激光器更容易产生稳定的多波长激光。由于半导体光放大器的3 dB增益带宽一般可达50 nm,增益谱平坦度好,保证了激光器多波长输出时带宽较宽,不同波长间功率波动较小。与其他类型的多波长光纤激光器相比,半导体光放大器光纤环形激光器腔长短,无需外加抽运光。此外,相比掺铒光纤毫秒量级的增益恢复时间,半导体光放大器载流子恢复时间仅为几十到几百皮秒,远小于几百纳秒的环腔渡越时间,因而半导体光放大器激光器弛豫振荡小,超模抑制效果好,故激光器工作稳定,具有很大的发展潜力。文献[7]报道了一种采用半导体光放大器光纤环腔结构,以高双折射光纤环镜为滤波器的多波长激光器,实现了连续可调谐的17个波长的稳定输出,其信道间隔100 GHz,峰值功率差小于6 dB,信噪比大于25 dB。文献[8]采用以法布里-珀罗(F-P)光纤干涉仪滤波的半导体光放大器光纤环形激光器,实现了间距50 GHz,51个波长的连续光激光,功率不平坦度约为4 dB。本文报道了一种插入信道间隔为100 GHz的马赫-曾德尔(M-Z)光纤干涉仪的半导体光放大器多波长光纤环形激光器,可输出24个波长的连续光,消光比大于30 dB。其中在17.9 nm光谱范围内的22个波长,功率不平坦度仅为1.2 dB,总输出功率为5.1 dBm。功率不平坦度性能指标优于文献[7,8]。实验观测了激光器输出光谱特性随半导体光放大器驱动电流和环腔损耗的变化。

2 实验装置

插入马赫-曾德尔光纤干涉仪的半导体光放大器光纤环形激光器实验装置如图1(a)所示,环中插入的马赫-曾德尔光纤干涉仪见图1(b)。实验中所采用的半导体光放大器为国外公司产品,在不同驱动电流下放大自发辐射(ASE)光谱如图2所示,其中200 mA驱动电流时放大自发辐射光谱3 dB带宽65.5 nm,中心波长为1510 nm。随着驱动电流的降低,其放大自发辐射峰值波长向长波长方向移动(红移)。这是由于半导体光放大器载流子密度减小,载流子向导带底部和价带顶部集中,平均带隙减小。由于半导体光放大器存在一定的增益偏振相关性,即两个偏振方向上的小信号增益和峰值增益波长不同,因此在激光器环腔内插入偏振控制器(PC)调节输入半导体光放大器的振荡光的偏振态。

实验中采用的透射型马赫-曾德尔光纤干涉仪

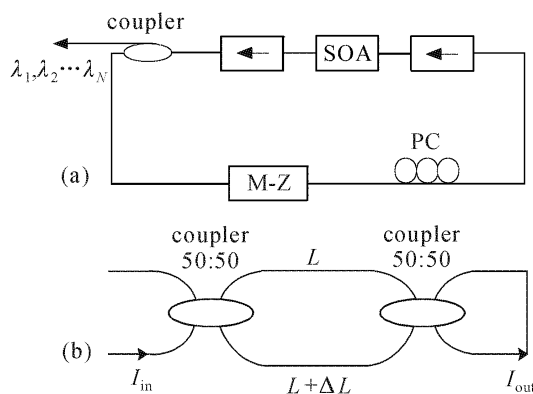


图 1

(a) 半导体光放大器多波长光纤环形激光器实验装置图;
(b) 马赫-曾德尔光纤干涉仪结构示意图

Fig. 1

(a) experimental setup of the SOA multi-wavelength fiber ring laser; (b) schematic diagram of the M-Z fiber interferometer

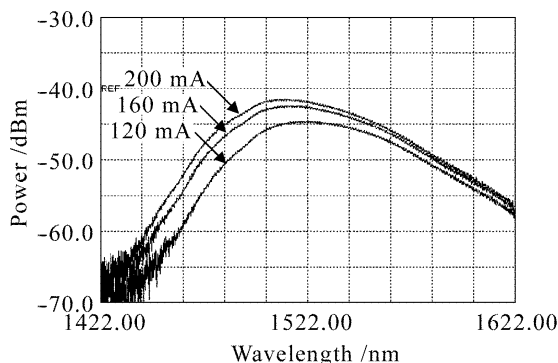


图 2 不同驱动电流条件下半导体光放大器的放大自发辐射光谱

Fig. 2 Amplified spontaneous emission (ASE) spectra of the SOA with different driving current

由两个3 dB光纤耦合器焊接而成,通过改变两臂光纤长度获得干涉仪的自由光谱区。由于采用全光纤化结构,制作十分简便,插入损耗小,透射波长范围宽。由于两臂光路可以做得很短(<1 m),受温度及环境振动的影响小,故稳定性较好。

干涉仪的透射率公式为

$$T(\lambda) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi \nu \Delta L}{c}\right) \right], \quad (1)$$

自由光谱区为 $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L}$,

也可写作 $\Delta\nu = \frac{c}{n\Delta L}$, (2)

式中 ΔL 为两臂长度差, n 为光纤折射率, λ 为入射光波长, ν 为入射光频率。为了估算色散导致的自由谱区 $\Delta\nu$ 的偏差,(2) 式对 n 取微分后有

$$d(\Delta\nu) = \frac{c}{n^2 \Delta L} dn, \tag{3}$$

色散参数 $D = \frac{dn}{c d\lambda}$, 所以(3)式可改写为

$$d(\Delta\nu) = \left(\frac{c}{n \Delta L}\right)^2 D \Delta L d\lambda. \tag{4}$$

自由光谱区为 100 GHz 时, 两臂长度差 $\Delta L = 2$ mm。设普通单模光纤在 1600 nm 处 $D = 20$ ps/(nm · km), $n = 1.5$, 若考虑在 1600 nm 附近 30 nm 范围内 $\Delta\nu$ 的变化量, 可求得 $d(\Delta\nu) = 12$ MHz。 $d(\Delta\nu) \ll \Delta\nu$, 因此, 色散导致的 $\Delta\nu$ 的非均匀性可以忽略。

若采用光纤切割方法自制马赫-曾德尔干涉仪, 光纤切割精度一般在 0.1 mm 范围, 因此由于切割精度造成的干涉仪自由光谱区的误差在 5% 的范围内, 若要严格符合国际电信联盟远程通信标准化组 (ITU-T) 标准, 则需要进一步改进制作工艺。

图 3 为采用光矢量分析仪测定的自制马赫-曾德尔干涉仪的透射光谱, 由图 3(a) 可看出该干涉仪透射谱在近 100 nm 范围内均匀性好, 插入损耗 1.35 dB, 透射峰值变化小于 0.1 dB, 消光比大于 10 dB。图 3(b) 显示了在 1600 nm 附近透射谱的细节。用光矢量分析仪测得干涉仪自由谱区为 99.8 GHz (偏差为 -0.2 GHz)。

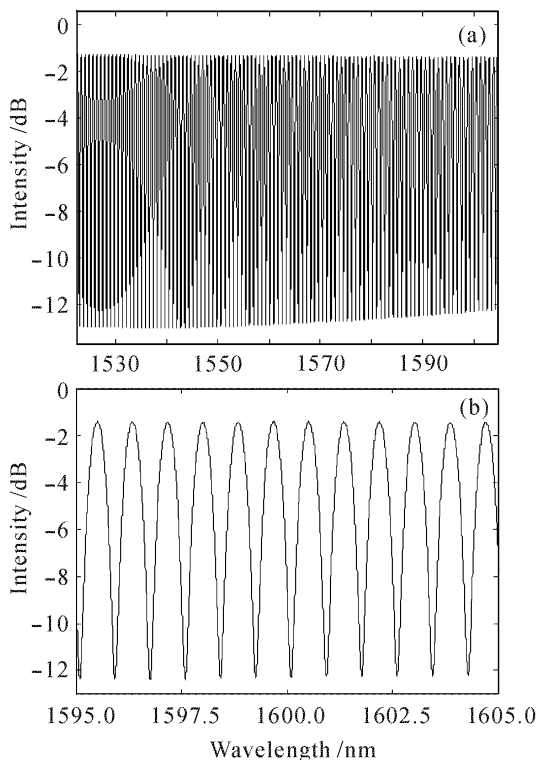


图 3 马赫-曾德尔干涉仪透射谱

Fig. 3 Measured transmission spectrum of the M-Z interferometer

3 实验结果与分析

当半导体光放大器驱动电流为 200 mA 时, 该光纤环形激光器输出光谱如图 4 所示。图 4(a) 显示在 3 dB 带宽 (19.5 nm) 内, 能输出 24 个波长的连续激射光, 消光比大于 30 dB, 中心波长为 1606 nm。将此 24 个波长的光谱放大示于图 4(b), 可见其中 22 个激射波长 (光谱范围 17.9 nm) 的功率不平坦度仅为 1.2 dB。激光器总输出光功率达 5.1 dBm。

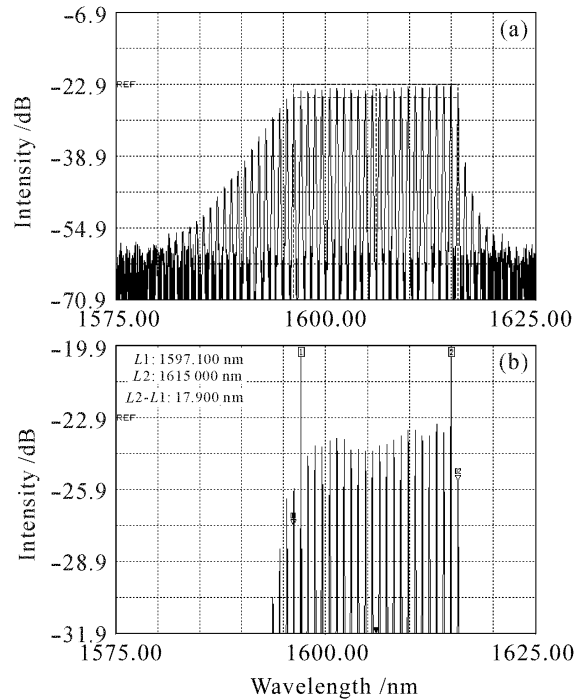


图 4 半导体光放大器多波长光纤环形激光器输出光谱

Fig. 4 Spectrum of the SOA multi-wavelength fiber ring laser

该激光器的起振过程中, 马赫-曾德尔干涉仪以自由谱区为间隔对腔内的放大自发辐射进行周期性滤波, 落在半导体光放大器增益范围内的透射峰中心波长附近的光可满足阈值条件而起振, 最终形成稳定的多波长激射。在实验中, 由于采用的马赫-曾德尔干涉仪透射谱稳定性好, 加之半导体光放大器中载流子恢复时间短 (一般为 100 ps), 远小于环腔渡越时间, 当外界环境导致环内激射波长光功率产生小幅扰动时, 该扰动将随时间迅速衰减, 不会形成弛豫振荡, 影响激光器的稳定输出。所以本文采用马赫-曾德尔干涉仪滤波结构的半导体光放大器光纤环形激光器较之其他结构的多波长激光器更为稳定。

半导体光放大器具有宽而平坦的增益谱, 在几十纳米范围内, 各激射波长获得的净增益差小, 有助于提高激光器的输出带宽。由于干涉仪插入损耗小

(仅1.35 dB), 环腔内总损耗较小, 激光器达到稳定振荡时, 腔内振荡光功率较高, 环内半导体光放大器处于深饱和状态, 其非线性效应增强。半导体光放大器的增益饱和效应使那些功率较高的波长的光获得的增益较小, 而功率较低的波长的光获得的增益较大。除此之外, 腔内多波长激射引起的半导体光放大器的四波混频(FWM)效应导致光功率向邻近波长转移, 某一波长光功率越高, 非线性效应越显著, 转移的功率越大。由分析可知, 这两种非线性效应的共同作用使环腔内多波长光功率获得自动均衡, 所以该激光器多波长输出的光功率平坦度高。

当半导体光放大器光纤环形激光器处于稳态工作时, 饱和状态下的半导体光放大器载流子密度相比小信号条件下大大降低, 其峰值增益波长明显向长波长方向移动, 加上四波混频效应有将光功率从短波长向长波长方向转移的作用^[9], 在我们的实验中, 多波长光纤环形激光器输出光谱的中心波长相对原半导体光放大器的放大自发辐射光谱中心波长的红移可达近100 nm(参见图4和图2)。

实验中测定了不同半导体光放大器驱动电流和环腔损耗下激光器的输出光谱, 其结果分别示于图

5和图6。

图5中可以看到随着驱动电流变小, 从200 mA减小到80 mA, 输出波长个数减少, 输出光谱3 dB带宽相应地从19.3 nm减小到9.3 nm。这是因为驱动电流的减小, 使半导体光放大器载流子密度减小, 小信号增益降低, 激光器净增益谱变窄。从图5中还可以观察到输出光谱中心波长从1597.3 nm蓝移到1593.9 nm, 其变化量较小。原因在于半导体光放大器的载流子密度减小引起的峰值增益波长红移与四波混频效应减弱引起的输出波长蓝移的效果部分抵消。

我们在腔内插入可调光衰减器(VOA)观测腔内损耗对输出光谱的影响, 从图6可以看出, 在相同的半导体光放大器驱动电流(200 mA)条件下, 当可调光衰减器损耗增加到2 dB以上, 输出光谱显著变窄, 且中心波长蓝移, 如图6(c), (d)所示。腔内损耗从0 dB增加到6 dB, 光谱中心波长移动达30 nm。这是由于腔内损耗增大, 振荡光强减小, 半导体光放大器载流子密度增大引起的峰值增益波长蓝移与四波混频效应减弱导致的输出波长蓝移的效果相叠加引起的。

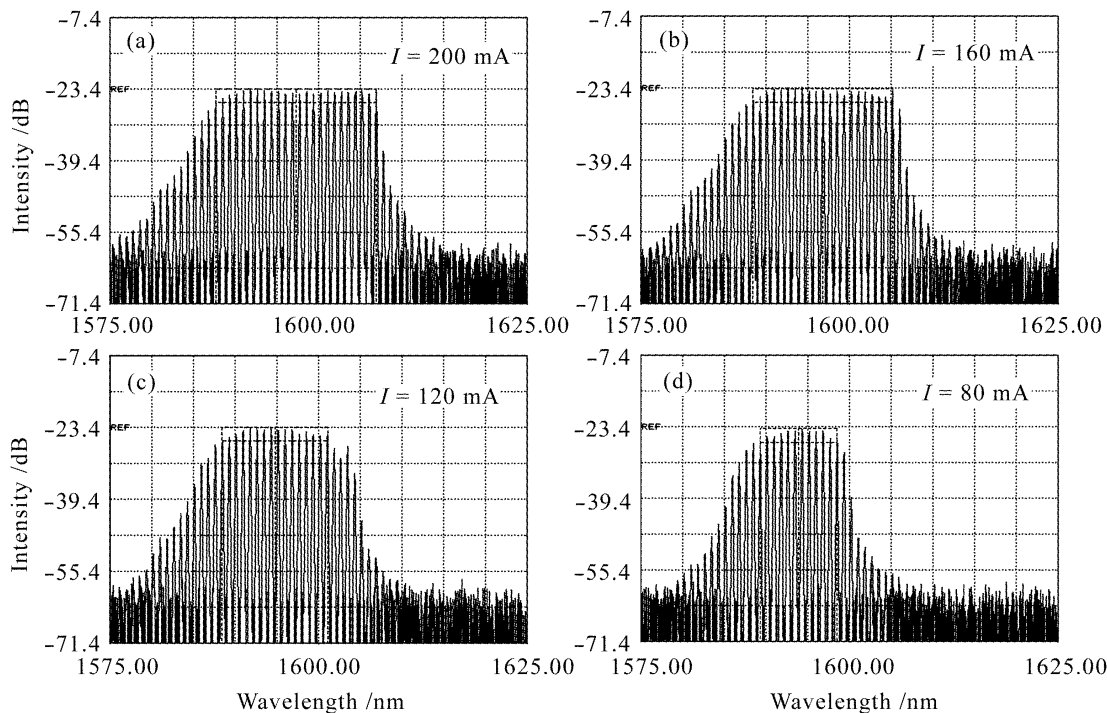


图5 不同半导体光放大器驱动电流下激光器的输出光谱

Fig. 5 Spectra of the laser with different driving current of the SOA

利用半导体光放大器多波长光纤环形激光器输出光谱受其驱动电流和环腔损耗影响的特性, 可以实现可调谐的多波长激光器。由于驱动电流对输出

光波长的变化影响远小于环腔损耗的影响, 因此波长调谐主要由后者决定。改变激光器腔内损耗, 可实现输出光波长调谐, 同时为维持激射波长数量不

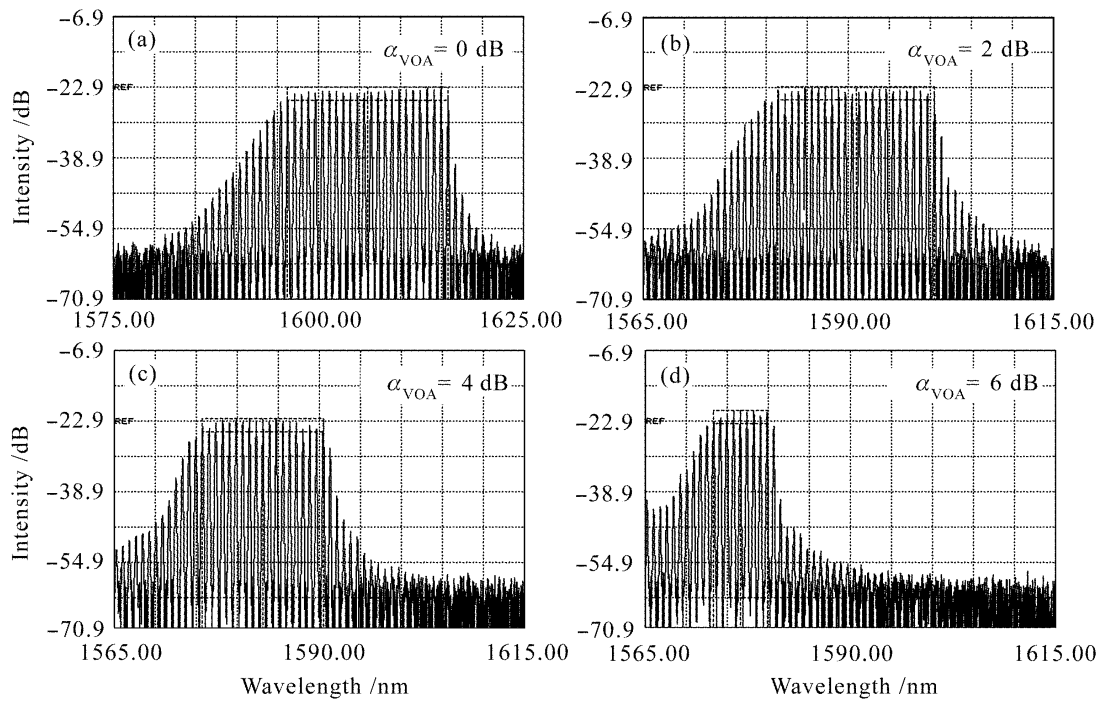


图 6 不同腔内损耗下激光器输出光谱

Fig. 6 Spectra of the laser with different loss of the ring cavity

变,可适当增减半导体光放大器驱动电流。

4 结 论

利用马赫-曾德尔光纤干涉仪和半导体光放大器构成的光纤环形激光器,实现了间隔100 GHz的稳定的多波长连续光激光。输出光谱3 dB带宽(19.5 nm)内包含24个激光波长,消光比大于30 dB。其中在17.9 nm范围内的22个波长,功率不平坦度仅为1.2 dB,总输出功率5.1 dBm。该方案具有结构简单、工作稳定、输出光谱宽、不同波长间输出功率波动小的优点。分析了该激光器的输出特性,并实验观测了半导体光放大器驱动电流和环腔损耗对激光器输出光谱特性的影响。利用该激光器输出波长随半导体光放大器驱动电流减小或环腔损耗增大而蓝移的特性,可实现输出波长的调谐。这种半导体光放大器光纤环形激光器将在光通信、光传感和光学测量等领域中获得广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Thibaut Sylvestre, Armand Vedadi, Hervé Maillotte *et al.*. Supercontinuum generation using continuous-wave multiwavelength pumping and dispersion management [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(13):2036~2038
- 2 Nam Seong Kim, Xingyu Zou, Kirk Lewis. CW Depolarized Multiwavelength Raman Fiber Ring Laser with over 58 Channels and 50 GHz Channel Spacing [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002 (OFC 2002), 2002. 640~642
- 3 Shilong Pan, Caiyun Lou. Stable Multiwavelength dispersion-tuned actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using nonlinear polarization rotation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13):1451~1453
- 4 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Yang Jing *et al.*. Study on stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser 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
- 5 Qiu Yishen, Lin Haifeng, Li Dengfeng. Multi-wavelength fiber laser using M-Z interferometer and composite cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1421~1424
邱怡申, 林海峰, 李登峰. 利用M-Z干涉仪和复合腔共同选频的多波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1421~1424
- 6 Bong-Ahn Yu, Jaejoong Kwon, Seunghwan Chung *et al.*. Multiwavelength-switchable SOA-fibre ring laser using sampled Hi-Bi fibre grating [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8):649~650
- 7 Wang Zhaoying, Hu Zhiyong, Bao Huanmin *et al.*. Tunable multi-wavelength fiber laser based on semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):321~324
王肇颖, 胡智勇, 包焕民等. 基于半导体光放大器的可调谐多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):321~324
- 8 Hongxin Chen. Multiwavelength fiber ring lasing by use of a semiconductor optical amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6):619~621
- 9 Govind P. Agrawal, Isam M. I. Habbab. Effect of four-wave mixing on multichannel amplification in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(3):501~505