

基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器

郝艳萍 张书敏 王新占 孟义昌 李辉辉 杜娟 李红飞

(河北师范大学物理科学与信息工程学院河北省薄膜材料实验室, 河北 石家庄 050016)

摘要 研究了一种新型、全光纤、宽带可调谐环形腔掺铒光纤激光器。该激光器利用由单模-多模-单模光纤组成的滤波器实现波长可调谐及激光器的全光纤结构。该滤波器将多模光纤缠绕在偏振控制器上, 两端分别与一段单模光纤相连, 通过调整偏振控制器的状态, 实现了中心波长 1542~1560 nm 的不同激光输出。单波长连续可调谐激光器的波长可调范围为 18 nm, 边模抑制比大于 40 dB, 3 dB 线宽为 0.096 nm; 进一步调整偏振控制器的状态和抽运功率, 实验同时得到了连续可调谐的双波长、三波长等多波长激光输出。对于可调谐的多波长激光器, 通过调整偏振控制器的状态, 可实现波长间隔及输出中心波长两者可调。

关键词 激光器; 可调谐光纤激光器; 多模光纤滤波器; 全光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0814006

Tunable Erbium-Doped Fiber Laser Based on Multi-Mode Fiber Filter

Hao Yanping Zhang Shumin Wang Xinzhan Meng Yichang Li Huihui
Du Juan Li Hongfei

(Hebei Advanced Thin-Film Laboratory, College of Physics Science and Information Engineering,
Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China)

Abstract A new-style, all-fiber, broad-band tunable erbium-doped fiber ring laser is proposed. The wavelength continuous tuning is realized by using a single-mode/multimode/single-mode fiber as a filter, in which the multimode fiber is wrapped around a polarization controller, and is spliced to a single-mode fiber at each ends. By carefully adjusting the polarization controllers in the cavity, the output central wavelength of tunable single-wavelength laser is tunable from 1542 to 1560 nm over a range of 18 nm, with a signal-to-noise ratio of 40 dB and the 3-dB linewidth of 0.096 nm. Furthermore, by appropriately rotating the polarization controllers and changing the pump power, wavelength continuously tunable dual- and triple-wavelength laser output is also experimentally demonstrated, and the wavelength selection and switching can be achieved by adjusting the polarization controllers in the cavity.

Key words lasers; tunable fiber laser; multi-mode fiber filter; all-fiber

OCIS codes 140.3510; 190.4370; 350.2450

1 引言

可调谐光纤激光器因其发射的激光波长能在一定的波长范围内连续可调, 进而具有可用一个光源代替几个激光光源的优点, 故在光通信、材料加工、医学及成像等方面具有广泛的应用。研究人员常采用光纤光栅^[1]、法布里-珀罗标准具^[2]、马赫-曾德尔

(M-Z)干涉仪^[3]和声光滤波器^[4]等作为波长可调谐器件。然而, 这些调谐器件一般为非光纤结构, 这样会使所组成的激光器插入损耗较大、不便于集成和实现全光纤连接、且对环境敏感。为实现全光纤结构的可调谐光纤激光器, 免去准直光路的麻烦, 人们常采用光纤布拉格光栅作为调谐元件^[5~7], 然而, 目前大

收稿日期: 2010-12-30; 收到修改稿日期: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11074065)、河北省自然科学基金(F2009000321)和高等学校博士学科点专项科研基金(20101303110003)资助课题。

作者简介: 郝艳萍(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: haoyanping_2007@163.com

导师简介: 张书敏(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事全光纤器件、光纤激光器和短脉冲光源等方面的研究。

E-mail: zhangsm@mail.hebtu.edu.cn (通信联系人, 中国光学学会会员号: 8040111668)

部分商品化的光纤光栅工作于通信波段,对于其他波段的光纤光栅需要定做,价格昂贵^[8]。

本文研究了一种基于多模光纤滤波器的环形腔可调谐掺铒光纤激光器。将多模光纤缠绕在偏振控制器上,两端分别与一段单模光纤相连,即可组成一个单模-多模-单模结构滤波器。通过旋转缠绕多模光纤的偏振控制器,产生对光纤的应力,改变多模光纤的长度,调整与波长相关的腔损耗,进而起到滤波器作用。

2 实验装置及调谐原理

2.1 实验装置

环形腔可调谐光纤激光器的实验装置如图 1 所示。激光谐振腔由半导体激光器(LD)组成的抽运源、980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、偏振控制器 PC₁、偏振无关光隔离器(ISO)、单模-多模-单模结构滤波器和输出耦合器(OC)组成。抽运源的中心输出波长为 974 nm,最大输出功率为 300 mW。所采用的掺铒光纤长 2 m,芯径为 125 μm,数值孔径为 0.2。偏振控制器 PC₁ 的作用是用于调整谐振腔内激光的偏振态。一段 2.4 m 长的多模光纤缠绕在偏振控制器 PC₂ 上,两端分别接一段单模光纤,组成一个单模-多模-单模结构滤波器。多模光纤纤芯直径为 105 μm,内包层直径为 125 μm,数值孔径为 0.22。90:10 的输出耦合器的 90% 输出端提供反馈,10% 输出端提供激光输出。隔离器保证 1550 nm 激光在环形腔中的单向运转。

2.2 单模-多模-单模结构滤波器的滤波原理

单模-多模-单模结构滤波器的滤波原理如下:单模光纤只能传输基模,腔内传输的光由单模光纤(SMF1)进入多模光纤(MMF)时,在单模到多模的熔接点处激励起多个模式,同时在多模光纤中传输,

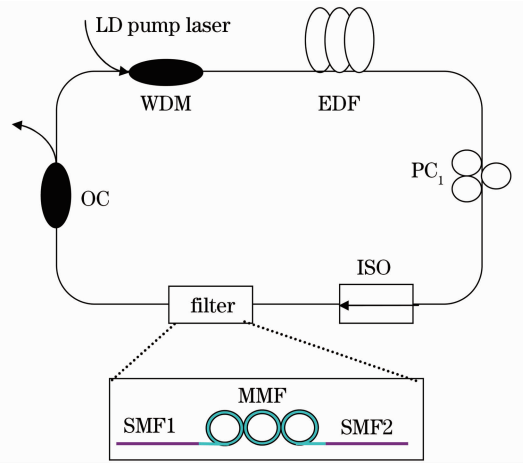


图 1 可调谐掺铒光纤激光器实验装置示意图
Fig. 1 Experimental setup of the tunable erbium-doped fiber laser

当把 MMF 缠绕在偏振控制器上,并适当旋转偏振控制器的角度时,可利用三个光纤环的旋转产生对光纤的应力,改变多模光纤长度,同时调整与波长相关的腔内损耗,使某些模式的光减弱,另一些模式的光加强。这样就导致多模光纤所传输各模式的光产生不同的损耗。当光再由多模光纤进入单模光纤(SMF2)时,在多模到单模的熔接点处,多模光纤出射端面上只有部分光强较大模式的光可以进入单模光纤传输,单模光纤起到了空间滤波的作用^[9,10]。这样就组成了一个简单的单模-多模-单模结构滤波器。

采用双程后向结构组成的放大自发辐射(ASE)光源作为宽带光源观测滤波器的滤波特性。实验发现,调整缠绕 MMF 的偏振控制器 PC₂ 时,由于 MMF 中多个模式同时传输,模式之间存在能量竞争。通过调整偏振控制器的状态,随着各波长之间的能量转化,可使滤波器的滤波特性不断发生变化。当 PC₂ 调整到某一角度时,在 1450~1510 nm 范围出现较明显的滤波特性,如图 2(a) 所示,此时在

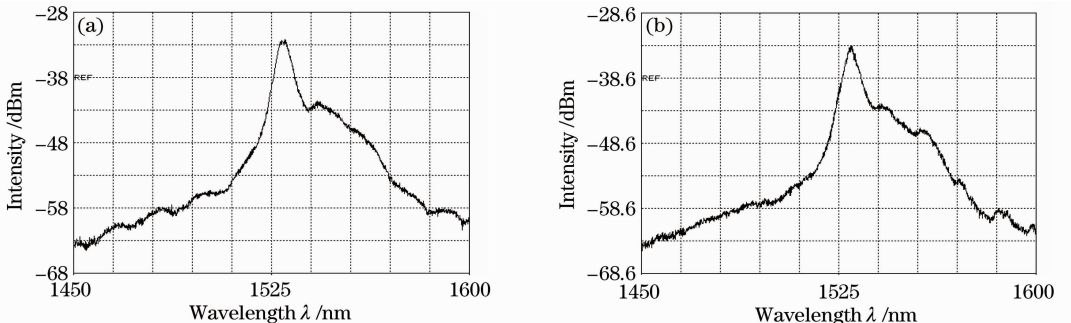


图 2 滤波器的滤波特性
Fig. 2 Filtering characteristic of the filter

1510~1600 nm 波长处滤波特性不明显。再适当调整偏振控制器到某一角度,在 1540~1600 nm 范围内多个波长处出现较明显的滤波特性,如图 2(b)所示。实验同时发现,随着抽运功率的增加,滤波器的滤波特性逐渐加强,滤波效果较明显。该滤波器可以通过优化多模光纤长度,适当调整偏振控制器角度,减小焊接损耗来进一步提高滤波特性。

3 实验结果和分析

3.1 可调谐单波长激光输出

激光器阈值为 8.59 mW, 进一步增加抽运功率到 47.5 mW 时,通过调整腔内偏振控制器 PC_1 , PC_2 的状态,激光器的输出波长在 1542~1560 nm 范围内连续可调,图 3 为实验所得不同输出波长处的激光光谱图。由图 3 可见,激光器调谐范围为 18 nm, 所得单波长的边模抑制比大于 40 dB, 当光谱仪分辨率为 0.01 nm 时,测得单波长激光的 3 dB 线宽为 0.096 nm, 如图 4 所示。

激光器调谐范围较小,若适当选择多模光纤长度,优化腔结构,调整偏振控制器,预测可以增加调谐范围,得到 1530~1560 nm 处单波长可调谐输出,即得到 C 波段的可调谐波长输出。

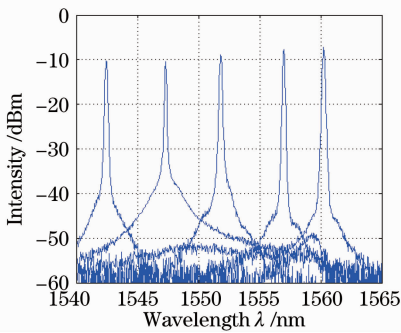


图 3 单波长激光输出光谱

Fig. 3 Output optical spectra of single-wavelength laser

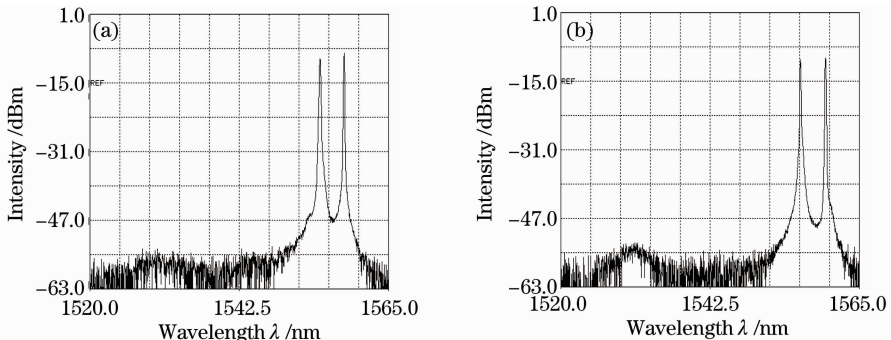


图 5 双波长激光中心波长可调谐输出

Fig. 5 Output spectra of dual-wavelength laser whose central wavelength is tunable

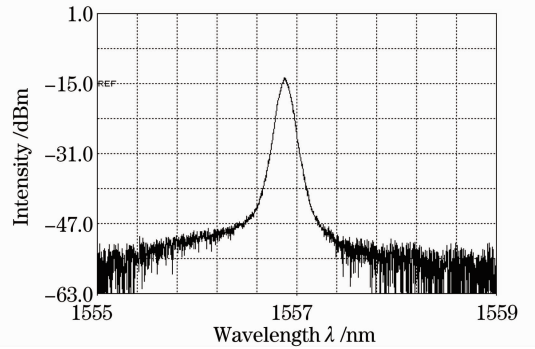


图 4 单波长激光的 3 dB 线宽输出

Fig. 4 Output 3 dB linewidth spectrum of single-wavelength laser

3.2 可调谐多波长激光输出

研究发现,进一步增加抽运功率到 71.5 mW 时,通过适当调整偏振控制器 PC_1 , PC_2 的状态,可得到双波长(如图 5,6 所示)、三波长(如图 7 所示)激光输出。研究同时发现,对于可调谐的多波长激光器,通过调整偏振控制器的状态,可实现波长间隔及输出中心波长可调。比较图 5~7 可知,在一定抽运功率下,由于模式竞争能量的转移,从单波长调谐到多波长的过程中,多波长平均峰值功率明显低于单波长峰值功率,而且波长数越多,峰值功率越小。

3.3 单波波长调谐过程

为进一步验证由单模-多模-单模结构滤波器的可调谐特性,实验进一步研究了单波长的调谐过程,如图 8 所示。适当调整谐振腔内偏振控制器 PC_1 和 PC_2 状态,波长由短波向长波方向移动时,已经出现的短波波长峰值功率逐渐减小,同时在长波方向出现一个峰值功率逐渐增加的长波,如图 8(b)~(f)所示,二者相互抑制,直至短波完全消失,长波完整出现,如图 8(g)所示,一个单波长调谐结束。由长波向短波方向移动时调谐过程与此类似。在调谐过程中发现长波和短波同时存在时,波长边

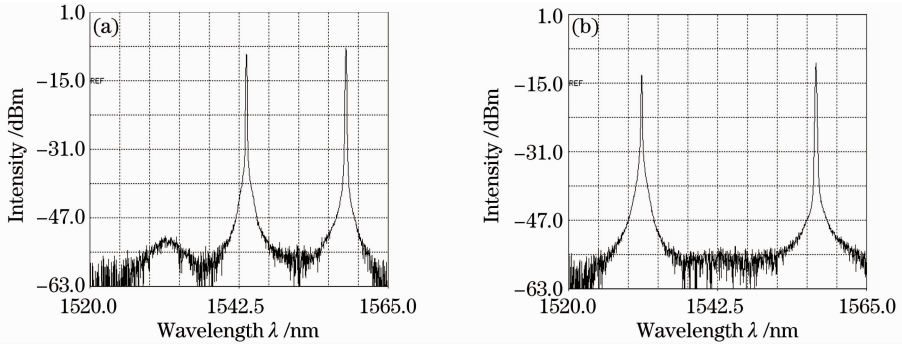


图 6 双波长激光波长间隔可调谐输出

Fig. 6 Output spectra of dual-wavelength laser whose spacing is tunable

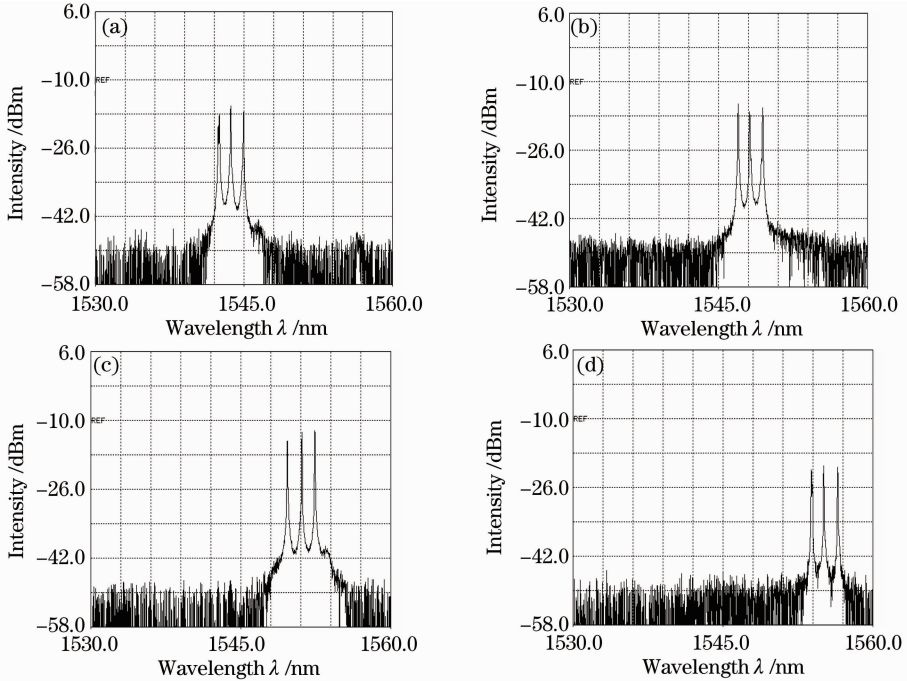


图 7 三波长激光可调谐输出

Fig. 7 Tunable output spectra of triple-wavelength laser

模抑制比比一个波长单独存在时要小,所以在调谐波长输出时,应尽量抑制其他旁侧模式,以增加单波长的输出功率或边模抑制比。

3.4 激光输出的稳定性

为研究可调谐激光器的稳定性,当激光器分别运转在单波长、双波长及三波长时,实验每隔 3 min 分别记录一次光谱,所得光谱图如图 9 所示。从图 9 可以看出,当多波长激光的波长间隔较大时,激光器输出稳定性较好^[11]。尽管掺铒光纤在室温下具有较宽的均匀增益加宽线宽,导致了严重的模式竞争效应^[12,13],但在谐振腔内加上单模-多模-单模结构滤波器之后,通过调整 PC₂ 的旋转角度,可调整与波长相关的腔内损耗,进而有效抑制模式竞争,使激光器实现稳定的可调谐单波长、多波长输出。研究同时发现,由于该激光器并未采用液氮低温环境

等方法抑制掺铒光纤的均匀加宽效应^[14,15],当激光器的波长间隔较小时,所得多波长激光器的边模抑制比较小,如图 8(d)所示,且稳定性较差。

3.5 滤波器损耗特性

为研究单模-多模-单模结构滤波器在谐振腔内的插入损耗,实验分别给出了激光谐振腔含有及不含有滤波器时的输出功率特性曲线(如图 10 所示)。由于单模光纤与多模光纤不匹配,滤波器接入环形腔内不可避免地引起插入损耗。因谐振腔内偏振控制器处在不同角度时,激光器输出波长不同,为研究偏振控制器调节过程中滤波器的插入损耗,实验同时给出了激光器工作在不同波长时的输出功率特性曲线,由图 10 可见,调整偏振控制器过程中,同样会引起损耗。

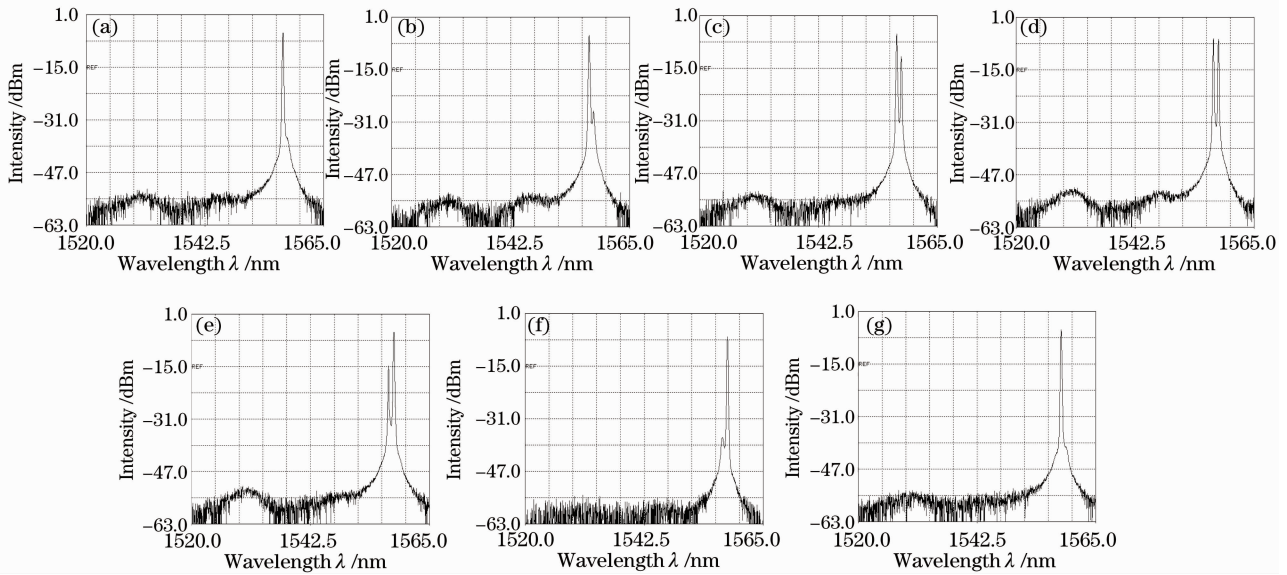


图 8 单波长激光可调谐输出过程

Fig. 8 Tunable-output evolution of single-wavelength laser

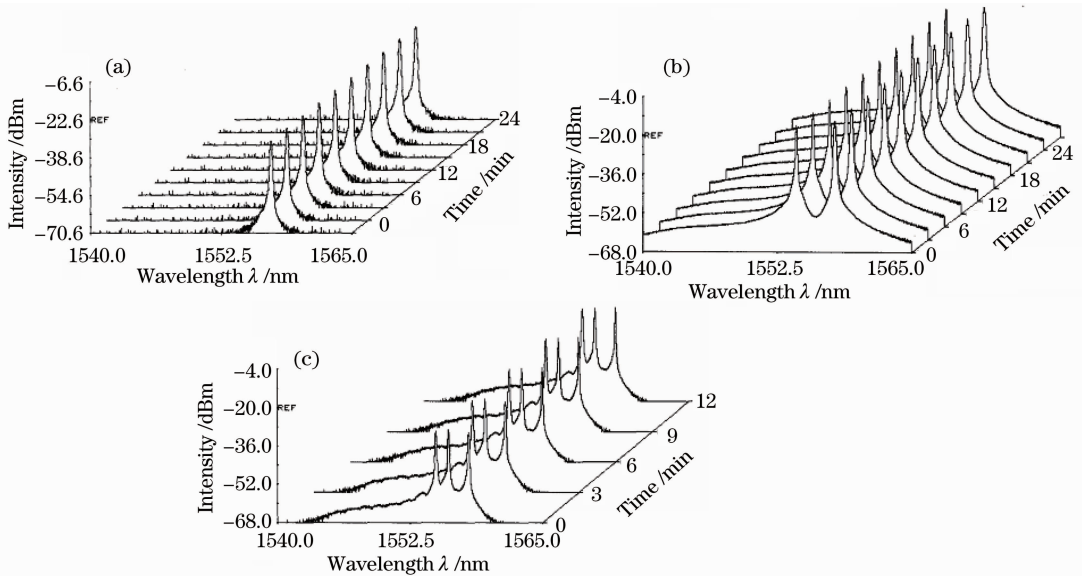


图 9 单波长(a), 双波长(b)和三波长激光(c)扫描光谱

Fig. 9 Scanning spectra of single-wavelength (a), dual-wavelength (b) and triple-wavelength (c) lasers

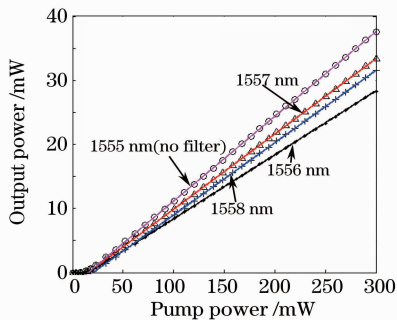


图 10 不同波长的输出功率特性曲线

Fig. 10 Characteristic curves of output power at different wavelengths

4 结 论

采用单模-多模-单模结构滤波器,通过调整偏振控制器状态,得到了单波长及多波长的激光器可调谐输出。单波长可调谐激光器的调谐范围为 18 nm,边模抑制比大于 40 dB,3 dB 线宽为 0.096 nm;实验同时观测了单波长的可调谐过程。对于多波长可调谐激光器,通过调整偏振控制器的状态,可实现波长间隔及输出中心波长两者可调。通过观测单波长和多波长连续输出,验证了该激光器输出的稳定性。实验同时研究了该种滤波器的插入损耗特性,发现滤波器接入环形腔内及调节过程中,均会引起一定的损耗。

参 考 文 献

- 1 H. Chen, F. Babin, M. Leblanc *et al.*. 70-nm tunable single-longitudinal mode erbium-doped fiber laser [C]. *SPIE*, 2003, **4833**: 956~962
- 2 Shilong Pan, Caiyun Lou, Yizi 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
- 3 Liao Bangquan, Feng Dejun, Ding Lei *et al.*. Tunable all-fiber Q-switched lasers based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(5): 450~452
廖帮全, 冯德军, 丁 镭 等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的可调谐全光纤调 Q 激光器 [J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(5): 450~452
- 4 Yang Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng *et al.*. Acousto-optic wavelength-tunable erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1030~1034
杨 薇, 刘 迎, 肖立峰 等. 声光可调谐环形腔掺铒光纤激光器 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1030~1034
- 5 L. Xia, P. Shum, Y. X. Wang *et al.*. Stable triple-wavelength fiber ring laser with ultranarrow wavelength spacing using a triple-transmission-band fiber Bragg grating filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2162~2164
- 6 C. S. Goh, M. R. Mokhtar, S. A. Butler *et al.*. Wavelength tuning of fiber Bragg grating over 90 nm using a simple tuning package [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 557~559
- 7 M. R. Mokhtar, C. S. Goh, S. A. Butler *et al.*. Fiber Bragg grating compression-tuned over 110 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(6): 509~511
- 8 Huang Xiujiang, Liu Yongzhi, Sui Zhan *et al.*. A widely tunable Yb³⁺-doped fiber ring laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(7): 771~774
黄绣江, 刘永智, 隋 展 等. 宽带可调谐掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(7): 771~774
- 9 A. Castillo-Guzman, J. E. Antonio-Lopez, R. Selvas-Aguilar *et al.*. Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 591~597
- 10 Li Chenguang, Yang Dewei, Li Chen *et al.*. An intrusion location sensor based on multimode fiber intensity modulation [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(1): 29~33
李晨光, 杨德伟, 李 琛 等. 基于多模光纤强度调制的扰动定位传感器 [J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(1): 29~33
- 11 M. Ajiya, M. H. Al-Mansoori, M. A. Mahdi. Widely tunable linear-cavity multiwavelength fiber laser with distributed Brillouin scattering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(3): 031401
- 12 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
- 13 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
- 14 Zhu Zongjiu, Wang Yalin. Experiment study of multiwavelength erbium-doped fiber laser with small wavelength spacing [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009, (31): 14~15
朱宗玖, 王亚林. 甚小波长间隔多波长掺铒光纤激光器的实验研究 [J]. *科技创新导报*, 2009, (31): 14~15
- 15 Liu Yange, 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