

文章编号: 0258-7025(2007)01-0050-05

单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性

张欣^{1,2}, 陈伟¹, 刘宇¹, 王欣¹, 谢亮¹, 祝宁华¹, 冯博学²

(¹ 中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)
(² 兰州大学物理科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要 介绍了一种多环形腔结构(MRC)的单纵模(SLM)掺铒光纤激光器(EDFL)。这种激光器通过在主环形腔中插入充当模式滤波器的三个长度不等的无源次级环形腔,并结合腔内光纤布拉格光栅(FBG)形成多环形腔掺铒光纤激光器结构,多环形谐振腔可保证激光器的单纵模输出。讨论了使激光器运行在单纵模状态的谐振腔理论。同时,为了提高系统输出的频率稳定性,采用外光注入方法有效地抑制了模式跳变和拍噪声,改善了输出谱特性。实验得到在1550.225 nm处输出功率约3.6 dBm,信噪比(SNR)>35 dB的单纵模输出光,且测得线宽小于500 Hz。

关键词 激光器;掺铒光纤激光器;单纵模;多环形腔;外光注入;线宽

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Single Longitudinal Mode Fiber Laser with Multiple Ring Cavities and Its Frequency Stabilization

ZHANG Xin^{1,2}, CHEN Wei¹, LIU Yu¹, WANG Xin¹,

XIE Liang¹, ZHU Ning-hua¹, FENG Bo-xue²

¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

² School of Physics Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract A single longitudinal mode(SLM) erbium-doped fiber laser (EDFL) with multiple ring cavities (MRCs) is proposed and experimentally demonstrated. The EDFL is structured by insertion of three different short passive subring cavities, which serve as mode filters, into the main cavity, and it is combined with a fiber Bragg grating (FBG), the MRCs resonator can make SLM lasing. The resonant theory of MRCs for SLM operation is discussed. At the same time, in order to stabilize, the frequency of output laser, external light injection techniques are employed to effectively suppress the mode jump and beat noise. Output power of 3.6 dBm and signal-noise-ratio (SNR) larger than 35 dB at 1550.225 nm, and linewidth less than 500 Hz are achieved for this laser.

Key words lasers; erbium-doped fiber laser; single longitudinal mode; multiple-ring cavity; external injection; linewidth

1 引言

单纵模(SLM)掺铒光纤激光器(EDFL)由于可以应用在光通信、激光光谱学、光纤传感等领域而备受关注并得到了迅猛发展。掺铒光纤激光器具有结构简单、激射波长可以精确预定、可实现宽带调谐和

窄线宽输出等优点,且与其他激光器相比具有许多优良特点:高增益、低阈值(几十毫瓦量级)、低噪声、高效率、抽运寿命长、有很好的单色性和高稳定性、小型化、易与传输光纤耦合。

对于掺铒光纤激光器,有单向环形腔结构与线性腔结构两种方案,前者具有较低的相对强度噪声、

收稿日期:2006-03-31;收到修改稿日期:2006-07-06

基金项目:国家自然科学基金(60510173,60536010,605060067)资助项目。

作者简介:张欣(1980—),女,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究工作。E-mail:zhxin@semi.ac.cn

导师简介:祝宁华(1959—),男,贵州人,研究员,博士生导师,目前研究方向为微波光电子器件的封装与测试。

E-mail:nhzhu@semi.ac.cn

低阈值、不存在空间烧孔效应(更有利于实现单频输出)等优点^[1,2],然而由于构成环形腔所需腔内元件和连接的光纤较多,导致整个腔长通常有几十米的长度。对于掺铒光纤激光器来说,腔长与纵模间隔成反比,因此长环形腔会造成在掺铒光纤增益曲线下有大量密集分布的纵模($10^5 \sim 10^6$),形成激光器的多模激射,增加了模式跳变的可能性,不利于激光器线宽的压窄。为了实现掺铒光纤激光器单纵模输出,综合近几年文献报道的研究结果,可归纳为以下几种不同的方法:采用复合腔结构选模^[3~5];利用半导体光放大器作为带通滤波器^[6];利用一段未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体,其形成的瞬态自写入光纤光栅具有窄带滤波特性^[7];利用腔内标准具^[8]等。

本文讨论的重点为复合腔结构选模,目前已报道的关于此种结构主要有:Chien-Hung Yeh 等采用双环结构结合两个法布里-珀罗(F-P)可调滤波器^[3],此方案结构简单,但实际操作时要把两个法布里-珀罗滤波器调至相同波长并保证波长不漂移,有一定难度;F. Liegeois 等提出结合光纤布拉格光栅(FBG)与若干马赫-曾德尔模式滤波器的方法来获得单频输出^[4],此方案结构复杂且要精确调节每个马赫-曾德尔滤波器的两臂长差,还有可能引入过多的损耗;Chien-Chung Lee 等首次提出了多环形腔(MRC)结构^[5,9],但实验系统同样较为复杂,且容易随环境温度的变化、振动等造成严重的跳模现象。本文提出并实验验证了一种利用多环形腔结构与光纤光栅结合,并通过外注入光稳频来实现单纵模激射的掺铒光纤激光器结构。研究了此种激光器的输出功率、光谱、频谱及线宽等特性,并得到了预期的结果。

2 实验装置与原理

多环形腔掺铒光纤激光器系统的实验装置如图1所示。在A,B端连接为(a)时,主环形腔包含以下元件:980 nm抽运的掺铒光纤放大器(EDFA);激射光经由90:10光耦合器(C1)输出(10%输出);通过环行器连接光纤光栅(反射峰位于1550.2 nm,反射率为95%,3 dB带宽为0.1 nm)以确定激光器激射波长;腔内插入隔离器 OC 保证光的单向传输并避免了空间烧孔效应的发生;在光纤光栅和输出耦合器之间插入偏振控制器(PC)用以调整腔内光的偏振态并稳定激光器。每个次级环形腔(RC1~RC3)都由一个2×2的3 dB耦合器(C2~C4)和一

段长度各不相同的单模光纤构成。此外,在A,B端连接为(b)时,为了解决系统输出光的频率稳定性问题,采用可调激光器(Agilent公司94819A型)通过耦合器C5的1%输入臂为系统输入外注入光,在可调激光器(TLS)与耦合器C5之间插入隔离器(ISO)可防止激射光的反射。输出光的测量系统使用分辨率为0.01 nm的ADVANTEST公司生产的Q8384型光谱分析仪测量此激光器的输出波长及功率;而激光器的频率特性及线宽则分别利用延迟零拍测量法和延迟自外差法通过光探测器在ADVANTEST公司R3182型频谱分析仪上测量与分析。

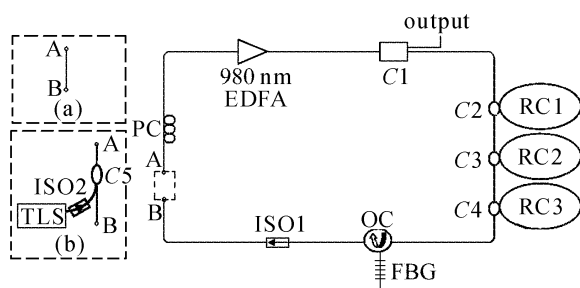


图1 多环形腔掺铒光纤激光器结构示意图
(a) 无外光注入情况下的多环形腔;(b) 外光注入稳频
Fig. 1 Experimental setup of the single-mode MRCs EDFA

(a) MRC configuration without external injection;
(b) with external injection

多环形腔掺铒光纤激光器的单纵模选择是通过结合光纤布拉格光栅和多环形腔结构实现的。其中,光纤布拉格光栅作为腔镜起着能量反馈与选频的作用,其不仅决定激射波长,而且充当模式限制元件对可能的激射模式提供初步的选择;但由于光纤布拉格光栅带宽较宽(约0.02 nm),因此由多环形腔结构提供进一步的模式选择,其原理如下:

主环形腔和次级环形腔谐振模式的相位条件分别表示为

$$\beta L_m = 2m\pi, \quad (1)$$

$$\beta L_s = (2n+1)\pi, \quad (2)$$

式中 L_m 为主环形腔腔长; L_s ($s = 1 \sim N$) 为次环形腔腔长 (N 为次级环形腔数); β 为传输常数; m, n 分别为正整数。激光器模式只有在同时满足以上主环形腔和所有次级环形腔谐振相位条件时才能起振。

(1), (2) 式相除得到

$$\frac{L_m}{L_s} = \frac{2m}{2n+1}, \quad (3)$$

根据光纤环形腔激光器基本理论,每一个环形腔的

自由光谱范围(FSR)(或称纵模频率间隔)与腔长 L_i 成反比,为

$$\text{FSR}_i = \frac{c}{n_e L_i}, \quad (i = m, s) \quad (4)$$

式中 c 为真空中光速; n_e 为光纤回路有效折射率(1.468)。

如图2所示,其中 FSR_m 为主环形腔自由光谱范围, FSR_{s1-3} 为1~3次级环形腔自由光谱范围,通常每一个环形谐振腔都有独立的谐振频率。但是根据游标原理^[10,11],如果选择各个环形腔的腔长使其满足(3)式,则对于多环形腔掺铒光纤激光器,其有效自由光谱范围变为

$$\text{FSR} = 2m\text{FSR}_m = (2n+1)\text{FSR}_s, \quad (5)$$

即多环形腔掺铒光纤激光器的有效自由光谱范围是各个主、次环形腔自由光谱范围($\text{FSR}_m, \text{FSR}_s$)的最小公倍数。相比单环形腔结构,多环形腔掺铒光纤激光器的模式抑制更加显著。



图2 多环形腔模式选择原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mode selection in the MRCs

3 实验结果与讨论

实验中选择主环形腔长度为21 m,对应于 FSR_m 为9.7 MHz;三个次级环形腔长度分别为3.8 m,3.0 m和2.4 m,对应于 FSR_s 分别约为53.8 MHz,68.1 MHz和85.1 MHz。尽管每一个环形腔的自由光谱范围都较小,但由以上的讨论可知,能通过多环形腔的游标原理获得高达几十亿赫兹的有效自由光谱范围。而在外注入情况下注入光波长调至与系统激射光波长一致,才能达到注入锁定的目的。首先利用光谱仪观察,图3(a)表示在无多环形腔结构及外光注入时环形腔掺铒光纤激光器的输出光谱,可以看出,其输出光波长很不稳定且存在众多模式;此时,通过可调激光器对系统施加与系统激射波长相同的外注入光(注入光光谱特性如图3(b)所示,其线宽在百千赫兹量级),以实现稳频的目的;加入多环形腔结构且在外注入时的多环形腔掺铒光纤激光器的输出光谱如图3(c)所示,可以看到,波长变得非常稳定,测得中心波长在1550.225 nm(对应于光纤光栅的反射峰波长),信噪比(SNR) > 35 dB,且线宽得到压窄,3 dB线宽 < 0.01 nm(受光

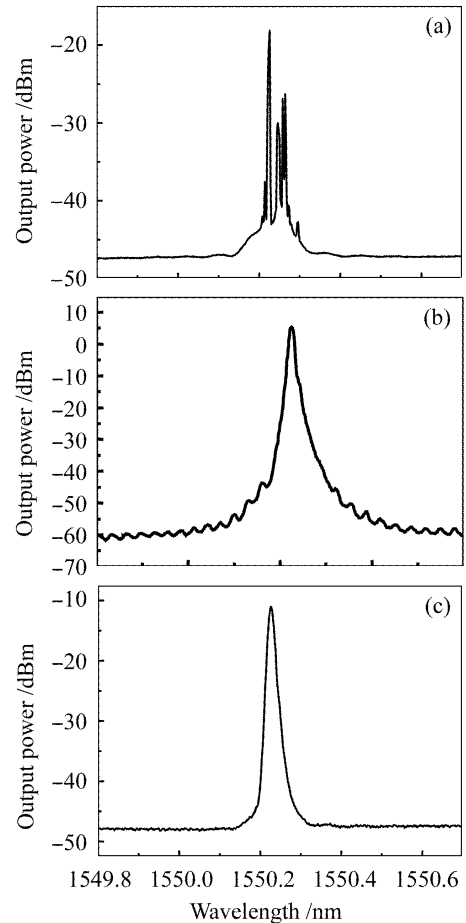


图3 激光器输出光谱(10%输出)

(a) 无多环形腔结构及外光注入;(b) 可调激光器输出谱;

(c) 加入多环形腔结构及外光注入后

Fig. 3 Optical spectra of laser output (10% output)

(a) without MRCs and external injection operation;

(b) output spectrum of tunable laser;

(c) with the MRCs and injection power of -22.2 dBm

谱仪分辨率0.01 nm的限制)。

通过延迟零拍测量法验证了多环形腔的模式抑制作用及外光注入的稳频作用,如图4所示。图4(a)表示无多环形腔结构及外光注入时掺铒光纤激光器的零拍谱线图,此时激光器运转在多纵模状态。这里的拍噪声的形成原因是:光纤光栅反射谱范围内存在很多纵模,这些纵模在环形腔内循环,其中一部分形成激射光,另一部分形成放大自发辐射光,与激射光差拍形成拍噪声,且放大自发辐射光之间也会形成拍噪声。当在主环形腔中加入一个腔长3.8 m(其自由光谱范围为53.8 MHz)的无源次级环形腔后,由于自由光谱范围增大,减少了可能得到振荡的多纵模数目,所以差拍信号数目减少,激光器输出得到改善,模式数减少,如图4(b)所示。图4(c)显示在加入两个腔长分别为3.8 m,3.0 m(自由光谱范围为53.8 MHz,68.1 MHz)的次级环形腔

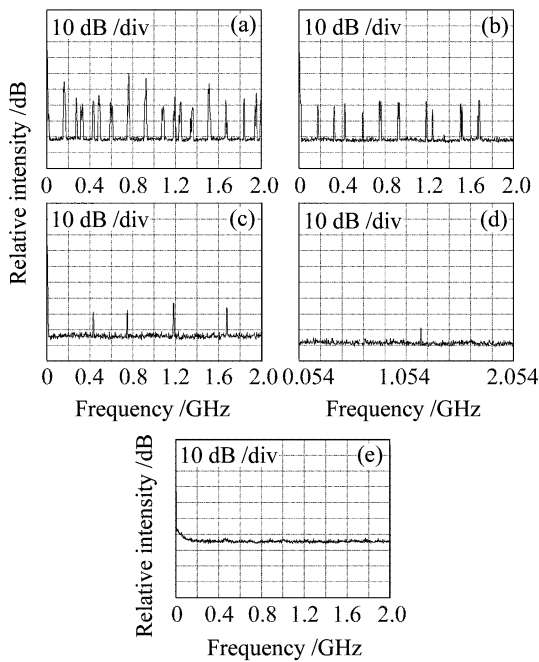


图4 多环形腔掺铒光纤激光器的零拍谱线图

(a) 无多环形腔结构及外光注入;(b) 加入一个长 3.8 m 的次环形腔;(c) 加入长 3.8 m 和 3.0 m 的两个次环形腔;(d) 加入三个次环形腔;(e) 外光注入后(注入功率 $6 \mu\text{W}$)

Fig. 4 Homodyne frequency spectra of the MRCs EDFL (a) without MRCs operation and external injection; (b) with one subring cavity of 3.8 m; (c) with two subring cavities of 3.8 m and 3.0 m, respectively; (d) with all three subring cavities; (e) after external injection with injection power of $6 \mu\text{W}$

后,激光器输出得到进一步改善,模式数明显减少;当加入第三个腔长为 2.4 m (自由光谱范围为 85.1 MHz) 的次级环形腔,并利用偏振控制器调节主环形腔腔内偏振态后,得到的激光器输出如图 4 (d) 所示。可以看出,原本存在的拍频噪声几乎完全被抑制,这主要得益于各个环形腔自己的纵模模式,与整个谐振腔的纵模模式形成游标效应,从而对本来大量存在的放大自发辐射纵模形成了很大的插入损耗;但是虽然采用了多环形腔结构,仍然有一条零拍谱线的出现,这说明尽管激光器输出光纯度得到大幅提高,但仍不是单纵模输出。分析原因,三个无源腔腔长均大于 2 m,所以整个系统不稳定,环境温度和震动的扰动都会造成严重的模式跳变;同时由于光在所插入的各个次环形腔中的偏振态与在主腔中的偏振态不匹配也会加剧输出光的不稳定性。因此,对系统采取稳频措施是必要的。虽然在各个次级环形腔中都加入偏振控制器,预期可改善此问题,但是同时也会使系统更加复杂。因此在现有实验条件下,采用了可调激光器对系统施加外注入光的方案。目前,注入锁定技术可用于可调谐超短光脉冲

的生成技术和波长变换技术中^[12,13]及提高激光器的输出稳定性^[14,15]。而在本方案中,同样利用注入锁定的原理结合多环形腔结构来获得系统频率稳定的单纵模输出。可调激光器输出波长调至多环形腔掺铒光纤激光器的激射波长,并微调使其与某一个模式重合,根据之前的讨论,得知在多环形腔结构中,模式间隔已经很宽,所以这种调节容易实现。外光注入后,仅需很小的注入功率就可使这一模式在模式竞争中取得优势,而迅速成长起来,此时系统对环境温度和震动的敏感性下降,从而达到了稳频的目的。如图 4(e) 所示,在注入光功率为 $6 \mu\text{W}$ 时,不再有零拍谱线出现,表示系统稳频后为单纵模输出。此外,在实验中,发现注入光功率必须达到一定值才能起到稳频的作用,测得此阈值为 $5.9 \mu\text{W}$ 。

图 5 为多环形腔掺铒光纤激光器的输出功率特性。阈值抽运功率为 28 mW;斜率效率为 13%;抽运功率为 45 mW 时,激光器输出功率约为 3.6 dBm。同时注意到抽运功率的增加,对激光器输出谱不会造成影响。实验通过多环形腔结构实现了模式抑制,同时压窄了输出谱线的线宽。图 6(a) 表示利用延迟自外差测量法测得多环形腔掺铒光纤激光器的拍噪声谱,设定 RF 频谱分析仪扫频范围 80 kHz,扫频时间 90 ms,测得仪器给出其半峰全宽(FWHM)为 560 Hz,但由于仪器最小分辨率带宽为 1 kHz,所以测量值 560 Hz 有可能是仪器的计算结果而不是实测值,因此只能判定线宽是小于 1 kHz 的。一般认为,半导体激光器和光纤激光器等固体激光器的输出谱线为洛伦兹线形,而气体激光器输出谱线为高斯线形;且通过函数拟合,证明此拍噪声谱具有洛伦兹线形,如图 6(b) 所示,图中正三角虚线表示实测线形,实线表示洛伦兹函数拟合线形。因此,激光器输出光 -3 dB 线宽为实验测得噪声谱线宽的三分之一^[16],即小于 500 Hz。

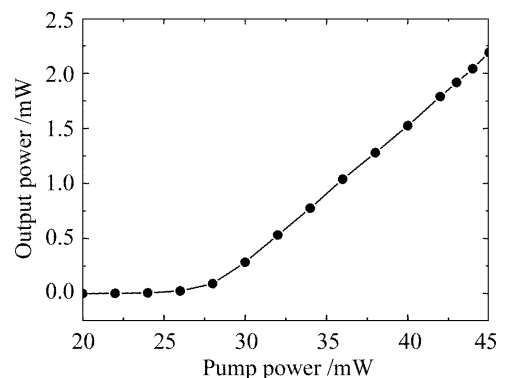


图5 激光器功率特性

Fig. 5 Laser output power versus 980 pump power

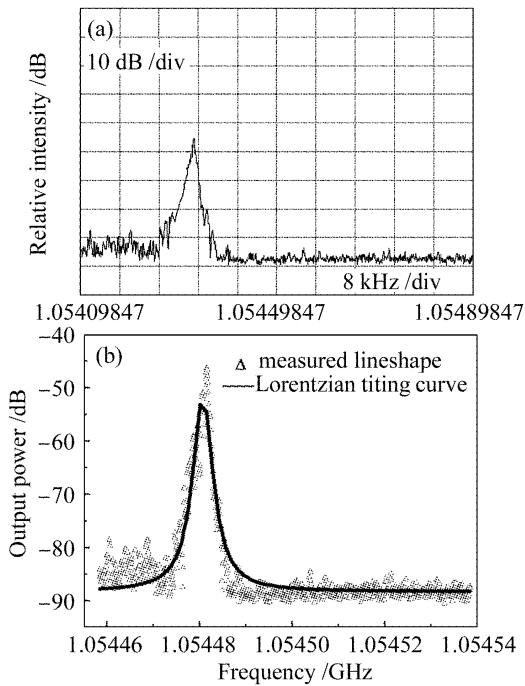


图 6

(a) 多环形腔激光器拍噪声谱线图;

(b) 利用洛伦兹函数对拍噪声谱的拟合曲线

Fig. 6

(a) beat noise spectrum of the MRCs EDFL; (b) fitting curve of Lorentzian function to the beat noise spectrum

4 结 论

对多环形腔掺铒光纤激光器这一新颖结构的光纤激光器进行了理论与实验研究,并提出了改善其输出频率稳定性的方案。通过在激光器主环形腔中插入三个腔长不等的无源次级环形腔,并结合腔内光纤光栅,多环形谐振腔实现了模式抑制;并利用外光注入实现了系统频率的稳定。此方法的主要优点是成本较低,装置简单易实现,且能获得稳定的单纵模光输出。通过实验研究了它的输出激光光谱、输出功率特性及频率特性,并利用延迟自外差法测量得出短期线宽小于 500 Hz,如何精确测量小于 1 kHz 时的线宽,需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, Y. Sun *et al.*. Singlemode diode-pumped tunable erbium-doped fibre laser with linewidth less than 5.5 kHz [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(23):2148~2149
- 2 Ning Ding, Huang Bangcai, Li Zhaohui *et al.*. Ring cavity

- Yb³⁺-doped fiber laser with frequency selecting by fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):190~194
- 宁 鼎,黄榜才,李朝辉等. 光纤光栅选频环形腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):190~194
- 3 Chien-Hung Yeh, Sien Chi. A wavelength-tunable erbium-doped fiber double-ring laser with stabilized single-frequency operation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(7A):5003~5005
- 4 F. Liegeois, Y. Hernandez, G. Peigne *et al.*. High-efficiency, single-longitudinal-mode ring fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(13):729~730
- 5 Chien-Chung Lee, Yung-Kuang Chen, Shien-Kuei Liaw. Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5):358~360
- 6 H. Chen, Dynamics of widely tunable single-frequency semiconductor fiber ring laser [J]. *Phys. Lett. A*, 2004, **320**(5-6):333~337
- 7 Jian Liu, Jianping Yao, Jian Yao *et al.*. Single-longitudinal-mode multiwavelength fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4):1020~1022
- 8 Yuichi Takushima, Shinji Yamashita, Kazuro Kikuchi *et al.*. Polarization-stable and single-frequency fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **16**(4):661~669
- 9 Chien-Chung Lee, Sien Chi. Single-longitudinal-mode operation of a grating-based fiber-ring laser using self-injection feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4):1774~1776
- 10 N. Onodera. Supermode beat suppression in harmonically mode-locked erbium-doped fibre ring lasers with composite cavity structure [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(11):962~963
- 11 Jianluo Zhang, John W. Y. Lit. All-fiber compound ring resonator with a ring filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(7):1256~1261
- 12 Chen Jiwu, Wang Dongning, Li Zhineng. Generation of wavelength tunable optical ultrashort pulse with simple scheme and high-quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1077~1080
- 陈吉武,王东宁,李志能. 波长可调谐超短光脉冲的简便高质的生成技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1077~1080
- 13 Jiang Huan, Wu Keying, Han Liuyan *et al.*. All-optical wavelength conversion technology using injection-locking in semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1183~1187
- 姜 欢,吴克瑛,韩柳燕等. 注入锁定半导体激光器全波长转换技术[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1183~1187
- 14 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Experimental researches of injection locking fiber ring resonator laser [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2001, **18**(6):525~529
- 俞本立,钱景仁,罗家童等. 注入锁定光纤环形腔激光器实验研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(6):525~529
- 15 Likai Zhu, Jinlong Yu, Yaotian Wang *et al.*. A method stabilizing the wavelength of mode-locked fiber laser with injected continuous wave [J]. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 2006, **48**(7):1385~1388
- 16 Liang Kefei, Chen Shixiang, Yang Darong. Measurements of laser linewidth [J]. *Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications*, 1991, **11**(2):32~35
- 梁可非,陈世翔,杨大容. 激光器线宽的测量[J]. *南京邮电学院学报*, 1991, **11**(2):32~35