

# 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究

马明祥 杨华勇 徐攀 胡正良 胡永明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 搭建了基于光纤迈克尔孙干涉仪的跳模检测系统,对抽运调制条件下的超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性进行了实验研究,测量了由抽运电流标定的表征跳模规律的跳模数据图。结果表明,随着抽运电流的不断增加,激光器先后经历模式稳定区、模式非稳区以及多纵模区三种状态;存在第二抽运阈值,当抽运强度超过这一阈值时激光器由单纵模跳变为非稳定的多纵模。掺铒光纤环形激光器的谐振腔因抽运热效应或外界扰动而变化时,会引发频率漂移与连续跳模现象。

**关键词** 激光器;光纤激光器;跳模;跳模检测;抽运调制

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0314002

## Investigation on Characteristics of Mode Hopping in Ultra-Narrow Linewidth Erbium-Doped Fiber Ring Laser under Pump Modulation

Ma Mingxiang Yang Huayong Xu Pan Hu Zhengliang Hu Yongming

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** One type of mode-hopping detection system based on fiber Michelson interferometer is set up. The influence of pump modulation on the mode-hopping characteristics of ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser is investigated experimentally through the system. The mode-hopping map of laser labeled by pump current is measured to reveal the mode-hopping characteristics. Numerical results show that the laser will orderly experience steady single-mode area, unsteady single-mode area and multimode area with the pump current increasing, and there exists a second threshold over which the laser will hop from single-mode into drastic multimode. Besides, frequency drift going with serial mode hops can be excited by pump-induced thermal effect or hostile disturbances applied on the laser cavity.

**Key words** lasers; fiber laser; mode hopping; mode-hopping detection; pump modulation

**OCIS codes** 140.3510; 030.4070; 140.3500

## 1 引 言

当前,跳模已成为高功率单频光纤激光器发展严重的制约因素<sup>[1,2]</sup>;同时,也恶化了超窄线宽单频光纤激光器的高相干性与低相位噪声等特性<sup>[3]</sup>,制约其在光纤通信与传感等领域的广泛应用。文献[4~9]报道了通过改善光纤激光器结构来提高模式稳定性

能,但无法彻底抑制跳模现象,在一定条件下跳模仍然会随机发生。前人在研究单频光纤激光器性能时,通常重点关注线宽压缩、高功率输出、噪声特性以及工程应用等问题,在实际测试中常会监测到跳模现象<sup>[1~4,9~11]</sup>,但并没有对跳模问题进行系统深入的研究。因此,进一步研究跳模的相关问题对改

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介: 马明祥(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤传感和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: guodongmamx@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤信息技术和光纤光栅技术等方面的研究。

E-mail: huyongming\_nudt@hotmail.com

善单频光纤激光器的稳定性能具有重要意义。

从激光原理的角度看,跳模是指激光器在当前纵模稳定振荡的情况下,另一净增益大于零的纵模通过模式竞争<sup>[12]</sup>逐渐获得更多的增益粒子,并最终取代原纵模建立稳定振荡的一个模式竞争过程。研究跳模主要包括模式竞争、跳模检测、跳模机理与跳模抑制等四个方面问题;然而,研究光纤激光器的跳模问题,需在具备一定的跳模检测手段基础上,从研究光纤激光器自身的跳模规律着手,为探寻跳模机理与跳模抑制技术奠定基础。本文搭建了基于光纤迈克耳孙干涉仪的跳模检测系统,对抽运调制条件下的超窄线宽掺铒光纤环形激光器(EDFRL)的跳模特性进行了实验研究;测量了由抽运电流标定的表征跳模规律的跳模数据图,分析讨论了抽运强度与腔长状态对激光器工作模式的综合影响以及相关的跳模机理。

## 2 实验装置

### 2.1 超窄线宽掺铒光纤环形激光器

图 1(a) 为全保偏环形腔结构的超窄线宽掺铒

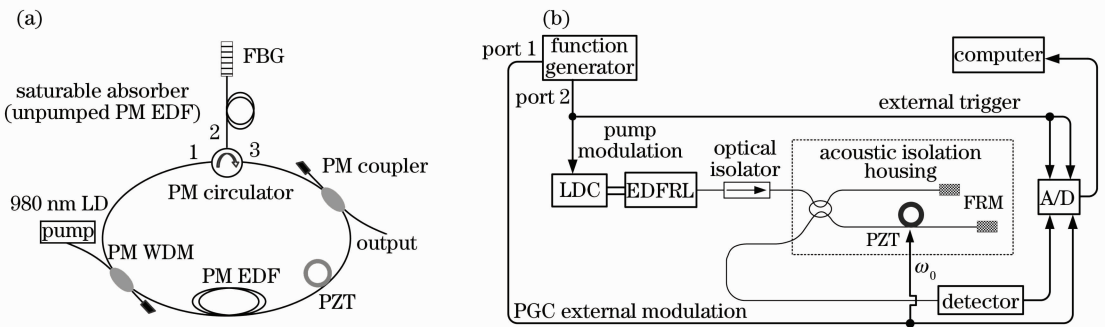


图 1 实验装置。(a)超窄线宽掺铒光纤环形激光器的原理示意图;(b)基于光纤迈克耳孙干涉仪的跳模检测系统示意图

Fig.1 Experimental setup. (a) Schematic of the structure of ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser;

(b) schematic of mode-hopping detection system based on fiber Michelson interferometer

### 2.2 跳模检测系统

图 1(b) 为基于光纤迈克耳孙干涉仪的跳模检测系统示意图。为抑制偏振衰落现象,干涉仪两臂采用法拉第旋镜(FRM)作反射端面<sup>[15]</sup>;为降低环境噪声的影响,将干涉仪置于声屏蔽与隔振装置内;通过在干涉仪一臂加上相位调制器(PZT)引入相位载波调制(PGC),并利用 PGC 解调技术<sup>[16]</sup>对干涉信号进行相位解调。该系统采用基于光纤迈克耳孙干涉仪相干度与 PGC 相位解调信号突变的两种跳模检测方法<sup>[17,18]</sup>,对抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的模式状态进行实时监测。其中干涉仪的输出信号、PGC 的外调制信号(port 1)及抽运

光纤激光器的原理示意图。图中 PM-WDM 为 980/1550 nm 保偏波分复用器,增益介质为连在其后的 4 m 保偏掺铒光纤,在 1536 nm 处的吸收系数为 17.57 dB/m;将其缠绕在相位调制器(PZT)上,可实现频率快速调谐<sup>[7]</sup>。抽运源为 980 nm 光纤光栅稳频的半导体激光器(LD),其抽运电流、工作温度等参数由驱动装置(LDC)控制。腔内的保偏光纤环形器起到两个作用,一是保证光在环形腔单向中传输,同时为未抽运掺铒光纤和光纤布拉格光栅(FBG)选频提供一个通道。在环形器 2 端口处的 2 m 保偏掺铒光纤为低增益光纤,1536 nm 的吸收系数为 3.9 dB/m;FBG 的反射带宽为 0.3 nm,中心波长为 1534.14 nm,反射系数 0.95。正向传输光和 FBG 反射的反向光共同作用在未抽运掺铒光纤内形成驻波干涉,由未抽运掺铒光纤内部饱和吸收效应而诱发的自适应可饱和吸收体光栅(SAG)起到精细选模与线宽压缩的作用<sup>[4,10,11,13,14]</sup>。腔内的振荡激光通过一个 3 dB 保偏光纤耦合器输出。其中抽运电流阈值为 60 mA,斜率效率为 8.4  $\mu\text{W}/\text{mA}$ 。

调制信号(port 2)分别经由模/数(A/D)采集卡同时采集;利用 port 2 对采集卡工作方式进行上升沿外触发,触发电压为 0.5 V,使系统所采集的每帧数据中 port 2 初始值相同,以便对多帧跳模数据进行比较与统计。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 单帧跳模数据的采集与分析

通常情况下,该掺铒光纤环形激光器可实现稳定的单纵模超窄线宽(小于 1 kHz)激光输出。测试发现,跳模作为一种内在噪声或干扰可能随机发生,严重影响和制约该类光纤激光器的性能与实际应

用<sup>[3]</sup>。当其工作在稳定的单纵模状态时,工作模式的稳态增益等于阈值损耗;而当激光器受外界因素影响时,可能导致工作模式的稳态增益损耗平衡关系被破坏(净增益小于零),使原工作模式在模式竞争中湮灭,进而引发跳模。然而,引发光纤激光器跳模的外界因素有多种,包括抽运功率、腔长扰动、机械振动、外界强声和温度漂移等;这些因素均能够为模式竞争与跳变创造条件,可以由某种因素单独引发跳模,也可能由多种因素交叉共同引发跳模。

为研究不同抽运功率下掺铒光纤环形激光器的跳模特性,实验中利用 port 2 给 LDC 施加低频三角波扫描电压,对抽运电流进行线性调制,通过监测干涉仪相干度与 PGC 相位解调信号来判断跳模。图 2 为抽运调制状态下系统采集到的一帧跳模数据,图 2(a)表示调制状态下的抽运电流,图 2(b)表示跳模时干涉仪输出的干涉信号,图 2(c)表示跳模时 PGC 相位解调信号。其中,抽运调制效率为 200 mA/V,调制频率为 0.89 Hz,抽运偏置电流设为 79 mA,抽运电流初值为 179 mA,最大值为 307 mA。

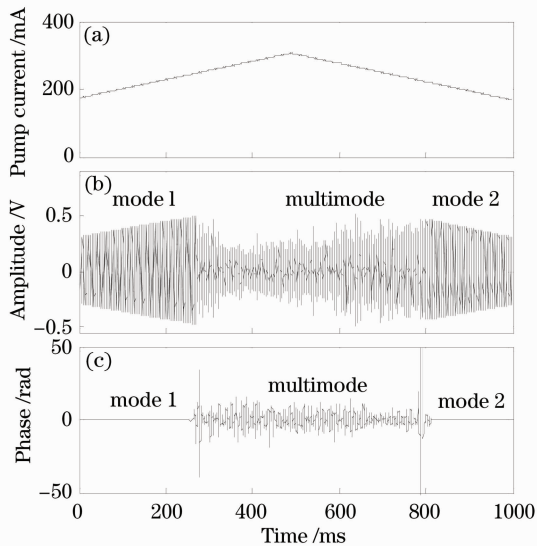


图 2 抽运调制条件下测得的跳模数据。(a)抽运电流;  
(b)干涉仪输出信号;(c) PGC 相位解调信号  
Fig. 2 Measured mode-hopping data under pump modulation,  
(a) Pump current; (b) output signal of interferometer;  
(c) phase signals by PGC demodulation

如图 2 所示,抽运调制除了使掺铒光纤环形激光器输出功率连续变化,还会影响激光器工作模式的稳定性。从 0~270 ms,随抽运电流持续增加,激光器输出功率不断增大,并一直工作在单纵模状态(mode 1);而在 270 ms 附近,当抽运电流增至 246 mA 时,激光器发生跳模,即由单纵模跳变为多纵模,并随抽运电流继

续增加一直处于非稳定的多纵模状态,多纵模之间复杂的模式竞争导致干涉仪相干度下降以及 PGC 相位解调信号出现偏差;直至抽运电流回降至 222 mA,激光器再次跳变为单纵模状态(mode 2)。

为描述跳模特性,将图 2 中 246 mA→307 mA→222 mA 之间的抽运扫描区间定义为激光器的多纵模区,将 246 mA 定义为激光器由单纵模跳变为多纵模的上升沿跳模阈值电流  $I_{th1}$ ,将 222 mA 定义为激光器由多纵模跳变为单纵模的下降沿跳模阈值电流  $I_{th2}$ ;并将激光器起振阈值(60 mA)视为第一抽运阈值,将跳模阈值电流  $I_{th1}$  视为第二抽运阈值。

### 3.2 连续多帧跳模数据的采集与分析

通过连续多次测量发现,跳模阈值电流无法保持稳定,随时间发生漂移。如图 3 所示,为抽运调制条件下基于连续多帧 PGC 相位解调信号的跳模数据图,图中从下至上依次为时间上连续的各帧跳模数据,并且每帧数据均在抽运电流按照图 2(a)方式调制时测得。

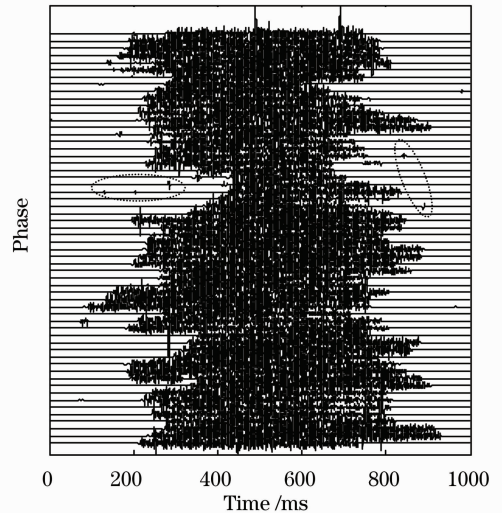


图 3 基于连续多帧 PGC 相位解调信号的跳模数据图  
Fig. 3 Mode-hopping map based on serial phase signals by PGC demodulation

由图 3 可知,在抽运电流处于上升沿扫描过程中,当其低于 200 mA 时,激光器一般工作在稳定的单纵模状态,即处于模式稳定区(包括 60~179 mA);当抽运电流继续增加时激光器进入模式非稳区,该区域内激光器模式稳定性明显下降,跳模概率增加,跳模方式表现为不同纵模之间的直接或间接跳变,如图 3 中虚线圈内所示,这种跳模通常导致 PGC 相位解调信号产生突变,为干涉仪引入虚假相位信号<sup>[17]</sup>;当抽运电流超过  $I_{th1}$  时,激光器进入处于模式竞争状态的多纵模区。

上述跳模现象与谐振腔内 SAG 的吸收损耗谱特性有关,由于腔内输入未抽运掺铒光纤的信号光随抽运电流增加而不断增强,使 SAG 边模抑制比不断下降<sup>[19]</sup>,以致无法完全抑制其他纵模的起振,导致工作模式的稳定性下降,增大跳模的可能性;随信号光的进一步加强,SAG 最终因信号光过度饱和而坍塌,失去精细选模与压缩线宽的作用,从而为多纵模起振与模式竞争创造条件。除了抽运过强会导致 SAG 坍塌与跳模外,若未抽运掺铒光纤内信号光无法形成稳定的驻波干涉,则 SAG 无法被稳定激励,同样也会引发跳模。为抑制在较高功率情况下激光器由单纵模跳变为多纵模,可将图 1(a) 环形腔内的保偏光纤环形器替换为具有一定分束比的保偏光纤耦合器<sup>[2,4]</sup>,以防止 SAG 内部信号光过强,但这无法避免其他因素所导致的跳模。

图 4 为跳模阈值电流  $I_{th1}$  与  $I_{th2}$  在测量图 3 时随时间的变化曲线。如图 4 所示,  $I_{th1}$  与  $I_{th2}$  在平均值(分别为 241.6 mA 和 228.8 mA)附近波动起伏,波动幅度高达 50 mA;  $I_{th1}$  与  $I_{th2}$  的差异体现了光纤激光器的光学双稳态特征。根据图 3 和图 4 可知,在抽运连续调制过程中第二抽运阈值远不如第一抽运阈值稳定,以致对于同一抽运电流值(例如 260 mA, 即对应图 3 中横坐标 320 ms 处),掺铒光纤环形激光器既能工作在多纵模状态,又能工作在单纵模状态,即能在两种状态之间跳变。这种现象可能是由谐振腔的相关参量因抽运连续调制产生的热效应<sup>[20~22]</sup>而无法保持稳定所导致,比如,谐振腔由于热效应能够产生微弱的伸缩变化。

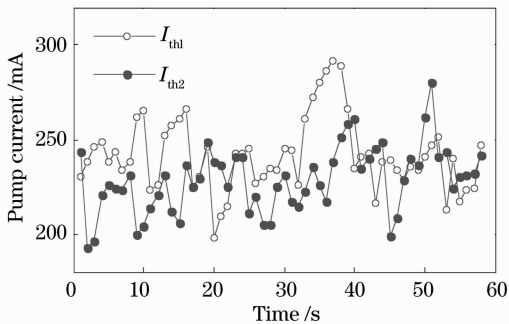


图 4 跳模阈值电流随时间的变化曲线

Fig. 4 Relation between mode-hopping pump threshold current and time

事实上,掺铒光纤环形激光器在运行过程中,其模式稳定性同时受抽运强度、腔长状态、光纤元器件稳定性等多种因素交叉影响。为测试腔长状态对模式稳定性的影响,首先设置抽运电流为 260 mA,使

激光器工作在多纵模状态,并利用腔内的 PZT 对腔长进行单向调制,然后对工作模式进行实时监测。整个测试过程中 PZT 在高压驱动下使腔长缓慢增加,结果如图 5 所示,从 0~280 ms,激光器由于抽运过强而工作在多纵模状态;随腔长的不断增加,在 280 ms 附近激光器由多纵模跳变为单纵模,并持续约 280 ms;然后激光器由单纵模跳变为多纵模,随腔长的持续增加工作模式在多纵模与单纵模之间来回切换。这说明抽运调制过程中掺铒光纤环形激光器腔长的变化能够导致第二抽运阈值发生漂移。

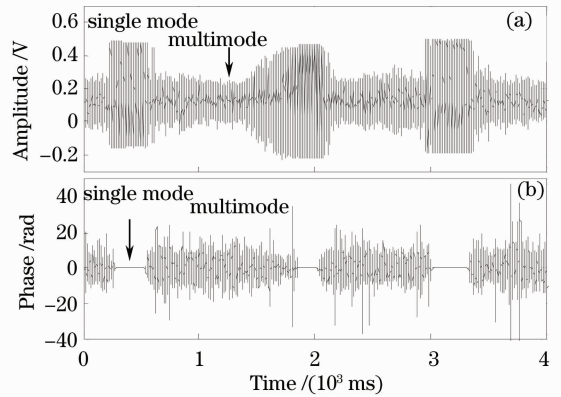


图 5 调节腔长引发的连续跳模现象。(a) 干涉仪输出信号;(b) PGC 相位解调信号

Fig. 5 Mode hopping occurs serially when cavity fiber is stretched. (a) Output signal of interferometer; (b) phase signals by PGC demodulation

然而,导致腔长不稳定的因素有多种,如环境噪声、机械振动、光纤内部的温度与应力分布等。在增益光纤中,被吸收的抽运光有相当部分转化为内能,抽运连续调制会导致铒纤内温度与应力分布(光纤折射率、腔长)随机变化<sup>[20~22]</sup>,这都可能为激光器中的模式竞争与跳变创造条件,并导致第二抽运阈值发生漂移。

实验发现,在掺铒光纤环形激光器开机瞬间,可以观测到频率发生单向漂移并伴随着连续多次跳模的现象,直至达到稳定的振荡模式,这也与开机瞬间谐振腔因突然吸收抽运光而产生的热效应有关;当设置抽运电流使激光器处于稳定的单纵模状态时,通过对腔长施加外界扰动也能触发跳模,例如,对腔内 PZT 施加低频大幅矩形波调制时,可以观测到周期性的触发跳模。另外,掺铒光纤环形激光器在跳模前后输出功率一般呈现一定幅度的快速波动,跳模过程中由于模式竞争输出光经光电转换后会引入拍频噪声<sup>[2,10]</sup>;由于 FBG 反射带宽内可起振纵模个数众多,跳模方式往往复杂多变,跳模持续时间一般

为几个毫秒量级<sup>[17,18]</sup>。

## 4 结 论

系统介绍了超窄线宽掺铒光纤环形激光器中的跳模问题, 对其在抽运调制条件下的跳模特性进行了实验研究与分析讨论。结果显示, 随着抽运电流的不断增大, 激光器先后经历模式稳定区、模式非稳区以及多纵模区三种状态; 存在第二抽运阈值, 当抽运高于这一阈值时激光器由单纵模跳变为非稳定的多纵模; 第二抽运阈值随时间发生漂移, 初步分析表明这是由腔长在抽运连续调制条件下无法保持稳定所致。实验发现, 掺铒光纤环形激光器腔长因抽运热效应或外界扰动而变化时, 会引发频率漂移与连续跳模现象。因此, 为实现稳定的单纵模输出, 该类光纤激光器的抽运强度不能超过第二抽运阈值, 并保持谐振腔相对稳定。由于跳模问题非常复杂, 文中主要讨论了抽运强度对掺铒光纤环形激光器工作模式的影响; 还有其他一些问题, 例如腔长状态、光纤元器件稳定性等因素对激光器的模式稳定性也有很大影响, 这些问题将留在以后进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 A. Polynkin, P. Ploynkin, M. Mansuripur *et al.*. Single-frequency fiber laser with 1 W output power at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3179~3184
- 2 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
- 3 Liang Xun. Investigation of Noise Analysis and Suppression Technologies in Fiber Optic Hydrophone System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 58~67  
梁 迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 58~67
- 4 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 5 J. L. Zhang, C. Y. Yue, G. W. Schinn *et al.*. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 104~109
- 6 X. F. Chen, J. P. Yao, F. Zeng *et al.*. Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(7): 1390~1392
- 7 Z. Meng, Z. L. Hu, Y. M. Hu *et al.*. Fast-tuning, narrow-linewidth, all polarization-maintaining fiber ring laser [C]. *SPIE*, 2007, **6552**: 65521C
- 8 Meng Li, Pan Zhengqing, Geng Jianxin *et al.*. A short-cavity phosphate glass fiber laser and its output characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 362~366  
孟 莉, 潘政清, 耿建新等. 短腔磷酸盐玻璃光纤激光器及其输出特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 362~366
- 9 Zhang Xin, Chen wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency

- stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 48~52  
张 欣, 陈 伟, 刘 宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 48~52
- 10 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with line-width less than 0.5 kHz [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2001, **18**(4): 345~348  
俞本立, 钱景仁, 罗家童等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(4): 345~348
- 11 Z. Meng, G. Stewart, G. Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183
- 12 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principles of Lasers [M]. Beijing: Press of the National Defence Industry, 2007. 169~171  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 169~171
- 13 K. Zhang, J. U. Kang. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14173~14179
- 14 M. Horowitz, R. Daisy, B. Fischer *et al.*. Narrow-linewidth, single-mode erbium-doped fiber laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8): 648~649
- 15 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6399~6402
- 16 Ni Ming. Investigation of the Key Technologies of the Fiber Optic Hydrophone [D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 61~65  
倪 明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2003. 61~65
- 17 Liang Xun, Yao Qiong, Hu Yongming *et al.*. Real-time mode hopping detection on narrow line-width laser source based on unbalanced fiber interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 437~442  
梁 迅, 姚 琼, 胡永明等. 基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模实时测试方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 437~442
- 18 Ma Mingxiang, Xu Pan, Hu Zhengliang *et al.*. Research on mode mopping detection based on the visibility change of fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2011, **32**(1): 123~127  
马明祥, 徐 攀, 胡正良等. 基于光纤 M-Z 干涉仪相干度变化的跳模检测研究[J]. 半导体光电, 2011, **32**(1): 123~127
- 19 M. S. Kang, M. S. Lee, J. C. Yong *et al.*. Characterization of wavelength-tunable single-frequency fiber laser employing acoustooptic tunable filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1812~1823
- 20 Huang Wencai, Ming Hai, Chen Xiyao *et al.*. Experimental studies of single frequency DBR fiber laser and temperature sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 695~697  
黄文财, 明 海, 陈曦曜等. 单频分布布拉格反射光纤激光器及温度传感实验研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 695~697
- 21 Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 494~497  
乔学光, 贾振安, 傅海威等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, **53**(2): 494~497
- 22 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1053~1057  
李绪友, 张 琛, 何 周等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环境温度性能研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1053~1057