

基于过耦合器的 L 波段可变波长掺铒光纤激光器

杨 扬¹ 乔学光^{1,2} 刘颖刚² 周 锐¹ 张敬花¹ 张 菁¹

¹ 西北大学物理系, 陕西 西安 710069

² 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 研究了一种新型的光纤环形镜(FLM)的原理和特性,这种 FLM 是由耦合比对波长变化的耦合器即过耦合器和偏振控制器(PC)构成,改变 PC 的状态,可以调节环的反射谱位置和深度。与高双折射光纤环形镜构成线型谐振腔,调整光纤环内 PC 的状态可以改变环对不同波长的反射率,控制腔内的增益从而输出可变波长的激光。实验得到输出波长在 1564~1592 nm 范围内,波长调谐范围为 28 nm,3 dB 线宽小于 0.2 nm,边模抑制比(SMSR)大于 40 dB 的稳定激光输出。

关键词 光纤光学; 波长可调; 过耦合器; 光纤环形镜

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214003

L-Band Variable Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Based on Over-Coupler

Yang Yang¹ Qiao Xueguang^{1,2} Liu Yinggang² Zhou Rui¹ Zhang Jinghua¹ Zhang Jing¹

¹ Physics Department, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

² Key Laboratory of Photoelectricity Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The principles and characteristics of a novel fiber loop mirror (FLM), which is composed of polarization controller (PC) and an over-coupler whose coupling ratio is sensitive to wavelength are investigated. The notch depths and positions of loops' reflection spectrum can be changed by adjusting the PC in the loops. The linear cavity of the L-band variable wavelength fiber laser consists of high-birefringence fiber loops and the over-coupler fiber loops. The reflectivity of various wavelenghtes and the laser gain are controlled by changing the states of the polarization controllers in the cavity. In the experiment, the stable output wavelength can be changed from 1564 nm to 1592 nm, over 28 nm tuning range. Within this range, the 3 dB line-width is less than 0.2 nm and the side mode suppression ratio (SMSR) is more than 40 dB.

Key words fiber optics; wavelength tunable; over-coupler; fiber loop mirror

OCIS codes 140.3600; 140.3480; 060.2380; 140.3510; 060.2410

1 引 言

光纤激光器较半导体激光器而言,具有高增益、转换效率高、结构简单和波长范围大等优点,随着光纤激光器的研究发展,波长可调谐掺铒光纤激光器在光纤传感、光谱分析和光通信等诸多领域均有着

广泛的应用,从而引起人们极大的关注^[1~5]。光纤激光器波长选择方式主要有光纤布拉格光栅^[6]、光纤法布里-珀罗(F-P)腔^[7]、声光可调滤波器^[8]和高双折射光纤环^[9]等,这些器件都是应用其滤波特性来实现波长选择的。光纤光栅采用粘贴温敏材料、

收稿日期: 2010-06-25; 收到修改稿日期: 2010-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(60727004)和西北大学研究生创新教育项目(09YSY10)资助课题。

作者简介: 杨 扬(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤光源与光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: yang2004114@126.com

导师简介: 乔学光(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤光学、光纤传感、光纤通信及光电子学等领域的教学等方面的研究。E-mail: xgqiao@nwu.edu.cn

悬臂梁和聚合物封装等方法提高光纤光栅的调谐范围,但制作工艺和过程复杂,装置机械精度要求高;而光纤 F-P 腔和声光可调滤波器昂贵的价格限制了在实际中的应用;高双折射光纤环作为波长选择器时,光纤环中多采用两段光纤,导致腔内损耗较大,阈值增大^[10]。本文采用一种耦合比随波长变化的耦合器构成光纤环形镜(FLM),通过调整 FLM 内偏振控制器(PC)的状态实现对波长选择性的反馈,从而输出波长可变的激光。实验得到波长在 1564~1592 nm 范围内可变的稳定激光输出,3 dB 带宽小于 0.2 nm,边模抑制比(SMSR)为 40 dB 以上,可作为实验应用激光器及其它器件的测试光源。

2 实验装置及原理

图 1 是两个光纤环构成线型腔的光纤激光器的实验装置,为了减少外界环境对激光稳定性的影响,除了 PC 以外的光纤器件都固定在实验平台上。工作介质是 6 m 长的高浓度掺铒光纤(EDF),型号为 HG980,在 1530 nm 峰值吸收系数为 9 dB,截止波长 890 nm,数值孔径大于 0.29,模场直径为 5.2 μm。采用 980 nm 的半导体激光器(LD),最高输出功率为 150 mW,实验中用 ANDO 公司的 AQ6319 光谱分析仪进行检测,测量范围为 600~1700 nm,最小分辨率为 0.01 nm。高双折射光纤(Hi-Bi fiber)取 60 cm,在 1550 nm 处的拍长为 2.4 mm,模场直径为 6.8 μm。3 dB 耦合器、高双折射光纤和 PC 组成 FLM1 具有梳状滤波的特性,过耦合器与 PC 构成的 FLM2 相当于一个可调的宽带反射镜,可以对 FLM1 的反射波长进行有选择的反馈,分别调节两个环中的 PC1 和 PC2,控制腔内增益损耗和选择波长,使某些波长的光在腔内增益达到阈值条件,形成激光振荡,并通过 FLM2 输出。

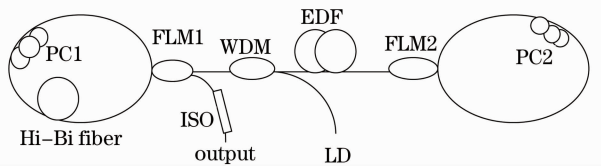


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

2.1 高双折射光纤环分析

高双折射光纤环分别由 3 dB 耦合器、高双折射光纤、PC 构成。入射光经过 3 dB 耦合器后,分成功率相等的两束光分别沿顺时针和逆时针传输,由于环内高双折射光纤的存在,不同偏振态的光传播相

同距离的光纤后获得的相位延迟不同,调整环中的 PC 可以改变进入高双折射光纤之前光的偏振态,使光束在光纤中传播产生相位延迟,导致沿相反方向传输的光束之间产生相位差,最终导致高双折射光纤环的反射或透射特性的变化。理论计算出环的透射率^[11]为

$$T = (1 - 2k)^2 + 4k(1 - k)(1 - \sin^2\theta \cos^2\delta), \quad (1)$$

式中 k 是耦合比,对于 3 dB 耦合器而言 $k = 0.5$; θ 为光纤沿轴向发生扭转,造成光纤的快轴或慢轴与坐标轴之间旋转角度; $\delta = \pi\Delta nL/\lambda$,其中 L 是高双折射光纤的长度, $\Delta n = |n_o - n_e|$ 是双折射效应引起的折射率差,因此高双折射光纤环具有正弦滤波的特性。理论分析输出的周期为 $\Delta\lambda = \lambda_c L_B/L$, L_B 是高双折射光纤的拍长, λ_c 是入射光的中心波长。所以高双折射光纤的拍长越小,长度越大,则光纤环形镜的反射或透射谱波长间隔越密集,选用不同类型的高双折射光纤及长度,可改变环的透射或反射谱的特性。

2.2 过耦合器光纤环理论分析

文献[12]中采用 PC 与 3 dB 耦合器构成 FLM 时,改变 PC 的状态,环的反射率随 λ 变化不明显,一般可忽略不计,仅是改变反射率的大小,说明耦合比的波长依赖性对 FLM 反射或透射率起着主要作用。为此采用耦合比随波长变化的耦合器,即过耦合器,这种耦合器构成光纤环时,环形镜的反射或透射将随着波长变化。

过耦合器是在熔锥拉制过程中,使耦合过程超过 3 dB 点,即器件处于过耦合器状态时,器件的输出特性与波长的依赖性关系逐渐增强,以至形成振荡,导致耦合比随波长变化。过耦合器的耦合比与波长近似有正弦曲线关系,近似地可描述为^[13]

$$k(\lambda) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\frac{2\pi}{\Delta\lambda} (\lambda - \lambda_k) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda$ 是耦合比随波长变化周期, $2\pi\lambda_k/\Delta\lambda$ 是相位参数。

过耦合器的光纤环境的理论分析与一般的光纤环类似,采用传输矩阵法进行理论分析^[14,15],忽略传输的相关损耗,偏振效应对耦合系数的影响,得出过耦合器的 FLM 的反射率为

$$R = 4k(\lambda)[1 - k(\lambda)](1 - \sin^2\phi \sin^2\psi), \quad (3)$$

式中 ϕ, ψ 分别是引入 PC 导致的光纤快轴(慢轴)与坐标轴间的旋转角和相位延迟。实验中的 PC 是由普通的单模光纤绕在三个刚性圆盘构成的,根据光

纤所缠绕的不同圈数使三个圆盘分别相当于 $\lambda/4$, $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片。因此三个圆盘相对水平方向的夹角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 可表示出 PC 的状态, PC 的状态 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 与 ϕ, ψ 有对应关系^[12]。图 2 所示的就是当取不同的 PC 状态时, 即 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 分别取 $(\pi/3, \pi/4, \pi/2)$, $(\pi/6, \pi/4, \pi/12)$, 过耦合器的参数 $\Delta\lambda = 120$, $2\pi\lambda_k/\Delta\lambda = 1.6$ 时, FLM 的反射率随波长的变化关系。理论模拟得出环的反射谱近似为梳妆滤波, 环反射率的周期是耦合比变化周期的一半, 位置或深度由耦合器的相位因子和 PC 的状态决定。

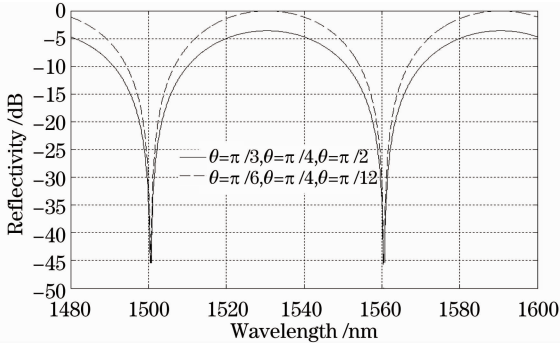


图 2 不同 PC 状态时反射率随波长的变化关系
Fig. 2 Reflectance versus wavelength in different status of polarization controller

3 实验结果与分析

采用光谱仪内置的 (SLD) 的宽带光源, 波长范围为 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$, 对高双折射 FLM 进行光谱分析如图 3 所示, 透射谱呈正弦波的特性, 调节环内 PC 的状态可以改变透射谱的位置或深度, 测量两个峰值或波谷间隔 $\Delta\lambda \approx 6 \text{ nm}$, 与理论计算结果相符。图 4 显示的是过耦合器的两个输出端的功率比值, 如图可知对于不同波长耦合比也随之变化, 在 1520 nm 和 1600 nm 处分光比为 $50:50$, 而在 1560 nm 处分光

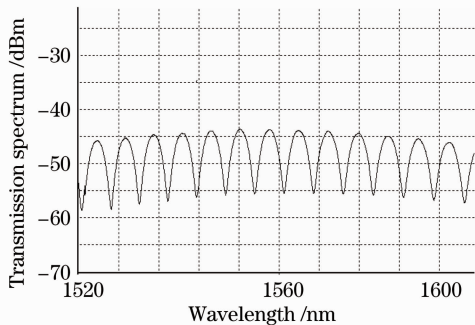


图 3 高双折射光纤环镜的透射谱
Fig. 3 Transmission spectrum of high-birefringence fiber loop mirror

比约为 $10:90$, 其它波段依次渐进, 这种过耦合器的插入损耗小于 0.2 dB , 隔离度大于 20 dB , 工作温度在 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$, 达到一般耦合器的性能指标。

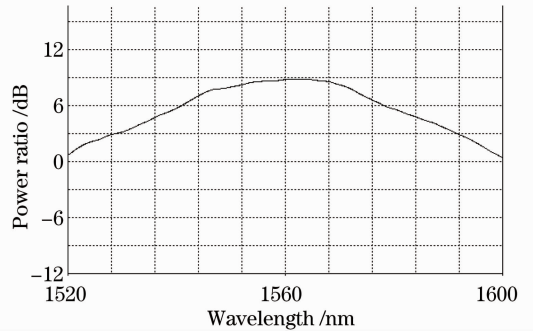


图 4 功率比与波长变化曲线

Fig. 4 Curve for power ratio versus wavelength

这种耦合器构成的 FLM 的反射谱如图 5 所示, 反射谱在 1562.5 nm 处下凹, 测量 3 dB 带宽为 15 nm , 改变 PC 的状态可以使反射峰在一定波长范围偏移, 并且可调节其波谷的深度。由于在环中插入的 PC, 相当于引入了可控的双折射效应, 尽管 PC 对相反方向传输光束的双折射强度相同, 但光束进入 PC 的方向相反, 从而两束光经 PC 传输后产生相位延迟, 调节 PC 的状态, 会改变两束光的相位差从而相干输出后使反射峰值发生偏移。反射谱的周期 60 nm 是耦合器周期的一半, 理论与实验符合得很好。

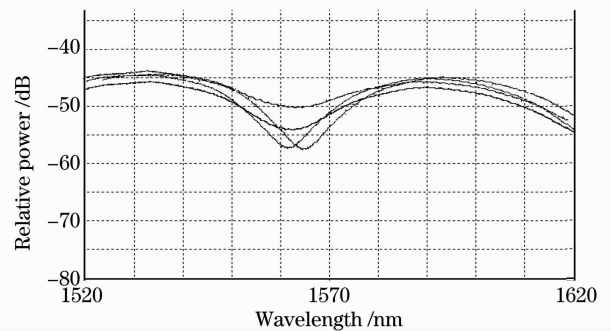


图 5 过耦合器光纤环镜的反射谱

Fig. 5 Reflectance spectrum of over-coupler fiber loop mirror

由于腔内的高双折射光纤与普通光纤之间的熔接损耗较大, 激光器的阈值较高, 当抽运功率为 60 mW 时, 在 1576.75 nm 处有激光输出, 若采用保偏光纤熔接机可以大大降低插入损耗, 获得更高功率的输出。调节环内 PC1 和 PC2, FLM1 端输出 $1564.5 \sim 1592.5 \text{ nm}$ 波长范围内的可调的光纤激光。激光的光谱图如图 6(a) 所示, 不同激光的输出功率都在 1 mW 以上, 3 dB 带宽均小于 0.2 nm , 边

模抑制比均大于 40 dB。图 6(b)是输出激光随时间的扫描图,实验中对波长为 1568.657 nm 的激光进行了 15 次扫描,每次扫描间隔 2 min,观察到 30 min 激光中心波长飘移在 0.1 nm 以内,功率改变

0.1 dBm,在此期间激光的 3 dB 线宽、SMSR 均无明显变化,可以看出输出激光的稳定性很好。图 7 为抽运光功率与激光输出功率关系曲线,输出功率随抽运功率近似呈线性变化,斜率效率约为 5%。

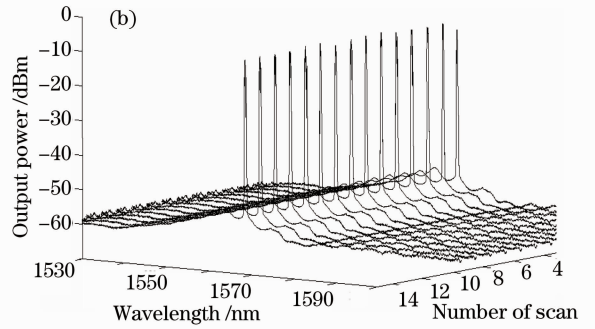
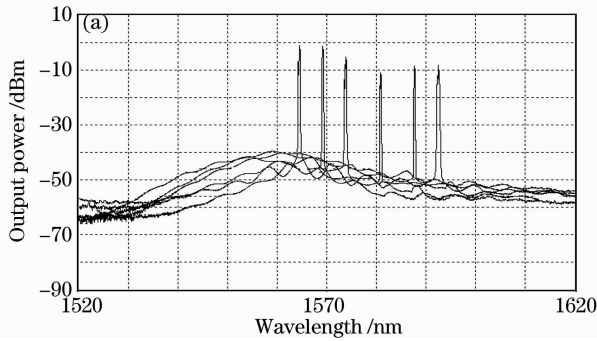


图 6 光纤激光器的输出光谱。(a)从左到右对应波长:1564.522,1568.210,1573.860,1581.750,1587.680 和 1592.466 nm,(b)光纤激光器的扫描图

Fig. 6 Output spectra of fiber laser. (a) from left to right: 1564.522, 1568.210, 1573.860, 1581.750, 1587.680 and 1592.466 nm, (b) scans of fiber laser

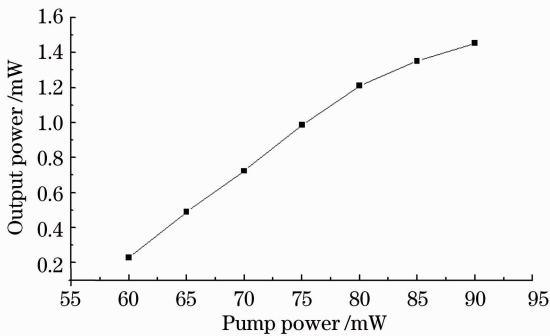


图 7 光纤激光器输出特性

Fig. 7 Output characteristics of fiber laser

一般 L 波段光纤激光器采用两段较长的 EDF,利用 EDF 在 C 波段的放大自发辐射(ASE)对另一段 EDF 进行抽运,使其增益谱的位置移到 L 波段,这种方式可以提高抽运效率并降低 ASE 噪声影响。对于构成谐振腔的激光器而言,由于光束在腔内往返振荡,所以不需要很长的 EDF 就能使其在 L 波

段稳定工作,实验中仅用 6 m 的高浓度 EDF 就可以达到使腔内增益移到 L 波段。选用过耦合器光纤环和高双折射光纤环作为谐振腔,通过调节环内的 PC,使其在调谐范围内有一个反射峰,并且可以改变反射峰的位置和深度,可将 FLM1 的有些反射波峰落在增益范围内,使某个波长的增益大于损耗,并且在竞争中占有优势时就形成激光。当 FLM1 为普通的光纤环时,光纤环可近似作为全反射镜,并且对波长变化不明显。由于过耦合器的反射谱带宽较大,在增益范围内各个模式之间相互竞争很大,很难形成稳定的光纤激光。而对于高双折射光纤环内光纤长度越长则其反射带宽越窄,这有利于窄线宽激光的形成。但假如光纤太长,光纤环中各个反射峰之间的间距将变小,有可能在 EDF 的增益谱范围内存在多个反射峰,这时会有几个波长同时满足谐振条件而在腔内形成激烈地竞争,激光稳定性就会随之下降。图 8 就是由于高双折射光纤环进行选频

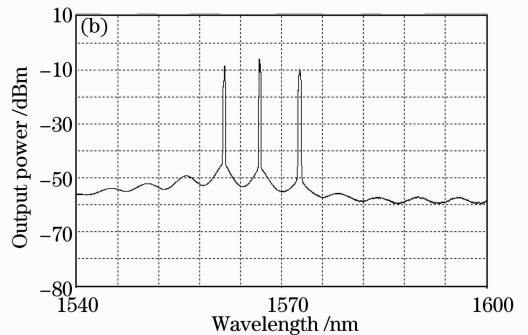
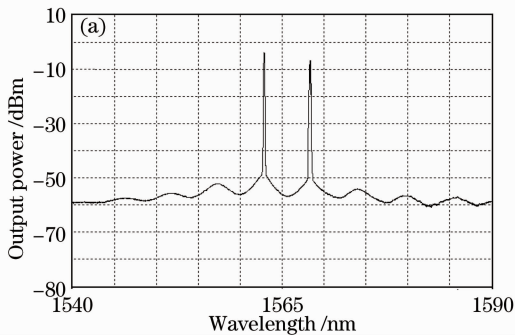


图 8 多波长激光输出

Fig. 8 Multi-wavelength laser output

时,有多个波长满足振荡条件,出现了双波长、三波长的激光输出。可见改变 PC 的状态,可以实现单波长到多波长的调谐。

4 结 论

本文采用两个光纤环构成线型谐振腔输出 L 波段可调谐的掺铒光纤激光器,其中过耦合器和 PC 构成的光纤环,可对腔内的增益和波长进行选择和控制,实现了波长在 1564.5~1592.5 nm 范围内,3 dB 带宽均小于 0.2 nm, SMSR 约大于 40 dB 的稳定激光输出。这种光纤激光器结构简单、输出激光稳定性好,可作为 L 波段光纤激光器的测试光源。

参 考 文 献

- 1 H. Ono, M. Yamada, T. Kanamori *et al.*. 1.58 μm band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3): 490~496
- 2 Z. Fu, D. Yang, W. Ye *et al.*. Widely tunable compact erbium-doped fiber ring laser for fiber-optic sensing applications [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(4): 392~396
- 3 Liu Yinggang, Qiao Xueguang, Jia zhen'an *et al.*. Tunable fiber laser and its application in optical fiber sensing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(8): 44~47
刘颖刚, 乔学光, 贾振安等. 可调谐光纤激光器及其在光纤传感中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(8): 44~47
- 4 Zhang Zhiqin, Ding Lei, Xing Jun'bo *et al.*. Experimental research of tunable S-band erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1885~1887
张志芹, 丁 镭, 邢俊波等. S 波段可调谐掺铒光纤激光器的实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1885~1887
- 5 Song Chuangxing, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Tunable mode-locked pulsed erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1292~1295
宋创兴, 徐文成, 罗智超等. 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1292~1295
- 6 Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050
李 坚, 刘 鹏, 王 静等. 以环形器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1047~1050
- 7 X. Dong, N. N. Quoc, S. Ping. Linear cavity erbium-doped fiber laser with over 100 nm tuning range [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(14): 1689~1694
- 8 H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim *et al.*. Actively gain-flattened erbium-doped fiber amplifier over 35 nm by using all-fiber acoustooptic tunable filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 790~792
- 9 Jing Wang, Kai Zheng, Jian Peng *et al.*. Theory and experiment of a fiber loop mirror filter of two-stage polarization-maintaining fibers and polarization controllers for multiwavelength fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10573~10583
- 10 Yang Shiquan, Meng Hongyun, Yuan Shuzhong *et al.*. Wavelength changeable L-band Er-doped fiber laser using a high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(10): 868~870
杨石泉, 蒙红云, 袁树忠等. 由高双折射光纤环构成的可调波长输出的 L 波段掺铒光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(10): 868~870
- 11 Feng Caixia. Study on Tunable Comb Filters Based on High Birefringence Fiber Sagnac Loops [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. 12~20
冯彩霞. 基于高双折射光纤 Sagnac 环的可调谐梳状滤波器研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009. 12~20
- 12 Feng Sujuan, Shang Liang, Mao Qinghe. Continuously adjusting the reflectivity of fiber loop mirror using a polarization controller [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4679~4684
冯素娟, 尚 亮, 毛庆和. 利用偏振控制器连续调节光纤环镜的反射率 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4679~4684
- 13 Liao Yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 114~116
廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 114~116
- 14 David B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224
- 15 K. Morishita, K. Shimamoto. Wavelength-selective fiber loop mirrors and their wavelength tunability by twisting [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(11): 2276~2281