

文章编号: 0258-7025(2010)07-1692-05

用于光纤激光陀螺的偏振分离型双向滤波器

饶范钧 陈淑芬 付 雷

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 提出一种偏振分离型的光纤布拉格光栅(FBG)双向滤波器, 可在光纤激光陀螺(FLG)中产生双向单纵模激光。滤波器中采用偏振分离的办法, 使双向的激光在 0.1 nm 带宽的光纤布拉格光栅中保持偏振态相互垂直, 在减少了双向能量耦合的同时, 隔绝了残余的背向反射, 之后导入偏振分束器(PBS)产生双向激光。经测试滤波器的插入损耗约为 3 dB, 背向散射损耗比大于 35 dB, 将滤波器接入环形腔中可得到波长 1550 nm, 功率一致的双向激光输出, 用扫描环形腔检验两路均为单纵模, 实现了双向滤波的效果。

关键词 激光技术; 双向滤波; 偏振分离; 光纤布拉格光栅; 光纤激光陀螺

中图分类号 V241.5⁺58; TN713 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1692

Bidirectional Filter Using Polarization Splitting in Fiber Laser Gyro

Rao Fanjun Chen Shufen Fu Lei

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A structure of bidirectional filter to achieve single longitudinal mode for fiber laser gyro (FLG) application is demonstrated using a 0.1-nm bandwidth fiber Bragg grating (FBG) as a filter element. In filter section, the two direction lasers are kept orthogonal polarized as to keep counter-propagating mode coupling in minimum. Then a polarization beam splitter(PBS) is used to guide bidirectional laser out of filter. The insertion loss is about 3 dB and back reflection loss is more than 35 dB by test. The 1550 nm wavelength is gotten with the filter accessing to the ring cavity. Single longitudinal mode is certified for bidirectional laser output by using scanning ring resonator, which proves that the device is fit for bidirectional filtering.

Key words laser technique; bidirectional filter; polarization splitting; fiber Bragg grating; fiber laser gyro

1 引 言

高精度、高可靠性的光学陀螺是航天、航海的制导、稳像稳瞄等惯性测量系统急需的核心部件, 主要包括光纤陀螺和激光陀螺。目前在高精度的陀螺市场上激光陀螺占绝对优势, 然而工艺复杂(如镀制 99.999% 的高反射膜和密封技术)且价格昂贵^[1~3]; 光纤陀螺则体小量轻成本低, 广泛应用于中低等精度的惯性系统^[4,5]。光纤激光陀螺(FLG)是一种力图将二者优点结合的产物, 其相关的研究报道源于 20 世纪 90 年代初期, 随着光通信用掺铒光纤放大器的成熟而被提出^[6]。在光纤绕制的谐振腔中用掺

铒增益光纤(EDF)替换激光陀螺的气体增益介质, 这使得 FLG 在原理上接近于激光陀螺, 而在结构形式上更接近于光纤陀螺。由于 FLG 可将光纤陀螺和激光陀螺的优点结合起来, 所以有望成为高精度低成本的新一代陀螺。

目前国内外均有一系列针对 FLG 结构的研究, 并对其双向谐振激光的特性进行了报道, 国内外进行此类陀螺研究的主要有韩国的 Roman Kiyon 等^[7,8]和中国科技大学的 Jingren Qian 等^[9]、清华大学的彭江得等^[10]、北京理工大学的张明等^[11]所在的实验室。研究的难点之一在于消除两个方向激光的

收稿日期: 2009-11-25; 收到修改稿日期: 2009-12-28

作者简介: 饶范钧(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: raofanjon@sina.com

导师简介: 陈淑芬(1955—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事新型激光器件与技术、光电子微器件与技术等方面的研究。

E-mail: chensf55@sina.com

能量耦合,在同一谐振腔内产生独立、稳定的双向窄线宽激光,这是 FLG 用于测量角速度和角加速度的技术基础。

针对光纤谐振腔中同时形成双向激光振荡的难点,本文提出一种用于 FLG 的双向滤波器,以光纤布拉格光栅(FBG)为基础对双向运转的激光进行滤波,同时在滤波和维持振荡的过程中隔绝了两个方向激光之间的模式耦合,最终输出双向的独立单纵模激光。

2 理论与结构模型

传统的激光陀螺与 FLG 的一个重要区别就是二者的增益工作介质不同。为了同时激起双向振荡,传统激光陀螺采用添加同位素,使两个方向激光的增益曲线稍微分离数百兆赫兹的方法消除模式竞争。然而使用同位素的方法不适合用在采用固体增益介质的光纤激光器中,因为其加宽类型为均匀加宽,而不是以多普勒效应为主的非均匀加宽。由于模式竞争,造成了固体增益介质的激光器同时产生双向振荡相当困难。要在 FLG 中产生双向激光,必须克服腔中的空间烧孔现象,减少正反两个方向激

光之间存在的能量耦合,因此有的采用腔中加入非互易元件的方法^[8]或采用使两方向激光偏振方向正交的方式^[9]。本文设计的基于 FBG 的滤波器在结构上可以保持顺逆两个方向激光的本征偏振态正交,由此降低激光在增益区的模式竞争,进而顺利输出双向的单纵模激光。

图 1 所示为接有双向滤波器的光纤环形腔的结构原理图,虚线框内为本文所采用滤波器的结构,包括两个起偏器($P_{//}$ 和 P_{\perp} , 其偏振方向分别为水平和垂直),偏振分束器(PBS), $\lambda/4$ 波片延迟器和用作滤波器件的 FBG。FBG 具有体积小、成本低、波长选择性好、易于和其他光纤器件融成一体等优点,目前制作工艺比较成熟,已经广泛应用于光通信^[12]、激光器^[13]、光传感^[14]等领域^[15]。然而,FBG 的物理特性决定了它是良好的带阻型滤波器(反射特定的布拉格波长)而不是带通型滤波器,虽然与环形器等器件结合后可组成单向的透过型滤波器,但无法用于 FLG 的双向滤波。因此,对于 FBG 这种单端口的反射型滤波器件,采用了偏振态分离的方法区分双向的激光。

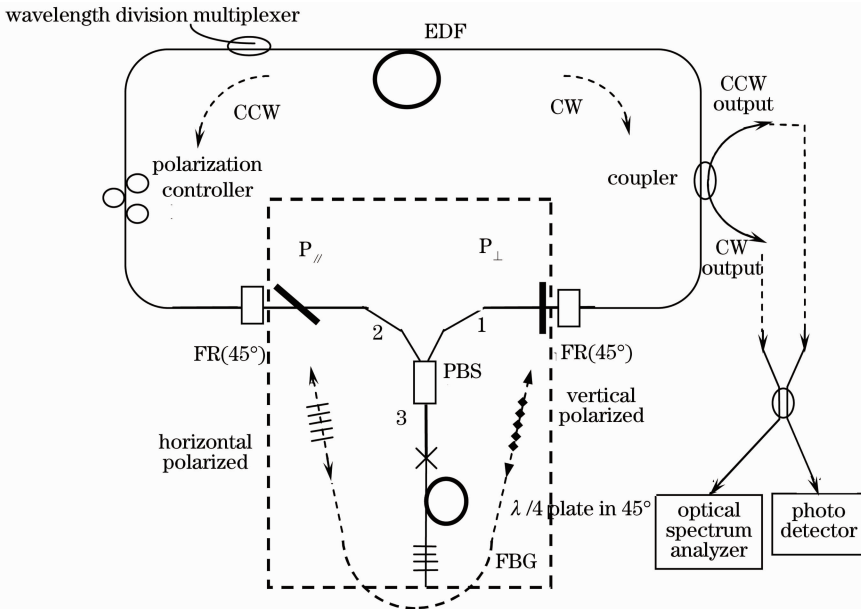


图 1 双向滤波光路原理图。FR: 法拉第旋转器

Fig. 1 Experimental setup of bidirectional filtering. FR: Faraday rotator

当顺时针方向(CW)和逆时针方向(CCW)的激光在 FBG 光纤段附近沿同方向传播时,偏振态始终保持垂直正交,于是可利用 PBS 将 CW 和 CCW 的激光重新分配到原来的前进方向。滤波器的下半部分由 45° 放置的 $\lambda/4$ 波片延迟器和 FBG 组成。由于 FBG 的反射,线偏光先后两次经过 $\lambda/4$ 波片延迟

器,其偏振态会被旋转 90° (比如把水平的线偏光转化为垂直状态),之后从 PBS 的另一个端口输出。

下面进一步用矩阵来描述其偏振态改变的过程。首先 CCW 的光通过 $P_{//}$ 后为线偏光,之后到达 PBS 的 3 端口。PBS 与两边的偏振器之间用保偏光纤连接。假设在不考虑器件损耗理想状态下,

CCW 的激光 $\mathbf{E}_{\text{in-ccw}}$ 可以分解为沿着空间中 X 坐标和 Y 坐标方向的光场分量 $E_{X\text{-ccw}}$ 和 $E_{Y\text{-ccw}}$,

$$\mathbf{E}_{\text{in-ccw}} = \begin{bmatrix} E_{X\text{-ccw}} \\ E_{Y\text{-ccw}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

经过水平偏振器 $P_{//}$, 其矩阵写为

$$\mathbf{P}_{//} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

之后线偏光进入 PBS 到达 3 端口, 它与 45° 放置的 $\lambda/4$ 波片延迟器相连接, 末端是窄带宽的 FBG 作为反射镜。在空间中偏振态的旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 θ 是偏振面转过的角度。 $\lambda/4$ 波片可用矩阵表示为

$$\mathbf{D}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

光纤光栅反射镜

$$\mathbf{M} = r \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 r 是光纤光栅的反射率。由于 CCW 的光被反射回 PBS 的 3 端口时, 其初始的水平偏振状态已经被旋转到垂直位置, 于是它被引到 PBS 的垂直偏振态输出端(1 端口), 这样 CCW 的激光恰好可以无损耗地通过垂直偏振器 P_{\perp} , 其矩阵写为

$$\mathbf{P}_{\perp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

CCW 的激光先后经过了 $P_{//}$, PBS(2-3), 45° 的 $\lambda/4$ 波片, FBG, 45° 的 $\lambda/4$ 波片, PBS(3-1), P_{\perp} 。于是在器件都处于理想的状态下, 最终透射的矩阵可写为

$$\mathbf{T} = \mathbf{P}_{\perp} \cdot \mathbf{R}(45^\circ) \cdot \mathbf{D}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{D}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{R}(45^\circ) \cdot \mathbf{P}_{//}, \quad (7)$$

最后输出

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{out-ccw}} &= \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}_{\text{in-ccw}} = \mathbf{P}_{\perp} \cdot \mathbf{R}(45^\circ) \cdot \mathbf{D}_{\lambda/4} \cdot \\ &\mathbf{M} \cdot \mathbf{D}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{R}(45^\circ) \cdot \mathbf{P}_{//} \cdot \mathbf{E}_{\text{in-ccw}} = r \begin{bmatrix} 0 \\ E_{X\text{-ccw}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

CW 的激光所经历情况与 CCW 是对称的, 一开始从右侧进入滤波器时处于垂直线偏状态, 之后被 $\lambda/4$ 波片和 FBG 翻转到水平状态, 从左侧输出, 其输出矩阵可写为

$$\mathbf{P}_{\text{out-cw}} = \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{E}_{\text{in-cw}} = r \begin{bmatrix} E_{Y\text{-cw}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

滤波器两侧的水平 and 垂直偏振器 $P_{//}$, P_{\perp} 有两个作用, 除了起偏作用外, 还有隔离滤波器残余反射

光的效果。由于 PBS 的消光比并非理想, 会导致某一偏振态的光(比如水平偏振态)被引到错误的输出口(垂直偏振态输出口), 此时这些泄漏的光将碰到和它偏振态相正交的偏振器 P_{\perp} 而被阻隔, 这样就进一步降低了滤波器的背向反射。同时在两侧各加上一个旋向的 45° 法拉第旋转器, 可与滤波器构成方向相关的偏振器^[9], 可使环形腔中 CCW 和 CW 分别产生相互正交的偏振光, 这样有利于抑制有源钕纤区域的空间烧孔, 降低两个方向模式的竞争, 最终获得双向的单纵模激光。

3 试验测试

试验中, 滤波器的 $P_{//}$, P_{\perp} 和 PBS 为保偏光纤连接。用于反射滤波的 FBG 是在低双折射的光纤上写入的, 3 dB 滤波带宽为 0.1 nm, 反射率 90%。 $\lambda/4$ 波片延迟器一般可采用扭转 $1/4$ 拍长(拍长为光的偏振态, 经过一个周期变化所通过的光纤长度)的保偏光纤作为波片^[16], 或用扭曲的光纤环绕制成^[17]。本实验采用后者, 将光纤光栅的尾纤部分截短至足够绕制 $\lambda/4$ 波片的长度, 与 PBS 的保偏光纤熔接后扭转 45° 。为防止振动等外界环境造成的影响, 波片在调整之后用硅胶固定位置。最后滤波器经过静态测试, 如图 2 所示, 调整入射激光波长, 使之与滤波器中的 FBG 波长相同, 可测得其背向反射光的损耗比大约为 35 dB, 这是由于波片制作误差, 偏振态不能准确旋转 90° 所致; 当测试的入射激光偏振方向调至滤波器一致时, 测得其光强损耗约为 3 dB。

之后将滤波器接入光路。980 nm 的抽运光源通过 980/1550 nm 的波分复用耦合器(WDM)与增益光纤相连。增益光纤长度约 3.5 m, 是 FIBERCORE 生产的掺铒光纤(EDF: DF1500L-980), 980 nm 波长处的峰值吸收系数为 12 dB/m, 在 1550 nm 波长处的峰值吸收系数为 18 dB/m。输出的耦合器为普通单模, 耦合系数 90:10。整个环形腔的腔长约 8 m, 其中 PBS 的 3 端口到 FBG 的距离算了 2 次。

当 980 nm 的抽运功率大于 10 mW 时, 耦合器开始输出激光。由于滤波器是偏振性的器件, 所以调整光路中的 PC 偏振控制器可以改变光纤的双折射状态, 使两个方向的激光功率达到最大值。整体的试验装置如图 1 所示, 两方向的激光先后分别用光谱仪观察, 其中心波长均位于 FBG 的反射区内(1549.87 nm), 如图 3 所示。

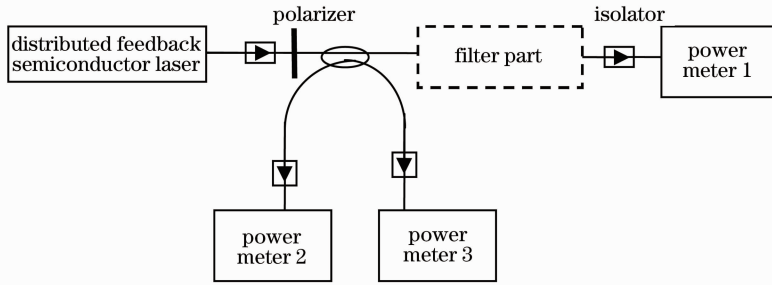


图 2 滤波器测试光路图

Fig. 2 Optical circuit for testing the filter element

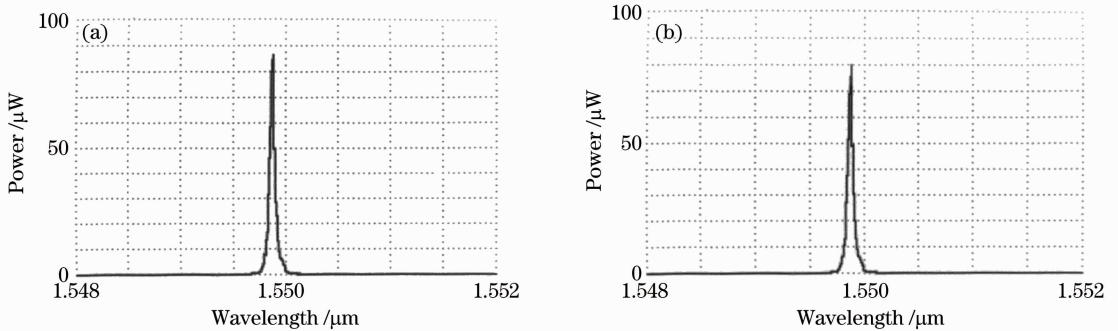


图 3 双向输出光谱图。(a)CCW 方向；(b)CW 方向

Fig. 3 Output spectra of bidirectional fiber laser. (a) CCW output; (b) CW output

由于光谱仪的精度不足以显示输出激光的纵模状态,因此采用了自制的光纤扫描环形腔加以观察。扫描环形腔由压电陶瓷(PZT)驱动,其扫描带宽约为 200 MHz,精细度即环形腔自由谱宽与透射谱的宽度之比约为 30,重复频率 20 Hz。环形腔输出接光电探测器,其纵模扫描如图 4 所示,(a)和(b)分别为 CW 和 CCW 方向的激光。在一个完整的扫描周期内只有一个波峰,因此可以看出每一方向的激光

均工作在单纵模状态。图 4(c)为两路的激光 CW, CCW 通过一个光纤耦合器合并到一路,输入光纤扫描环形腔中得到的纵模图,这样可同时观察两路激光纵模的相对情况。可看出图中一个周期内两个独立的波峰对应着锯齿波不同的扫描电压(PZT 上的扫描电压决定了环形腔梳状谱线的频率),进而表明两路激光存在固定的频率差。

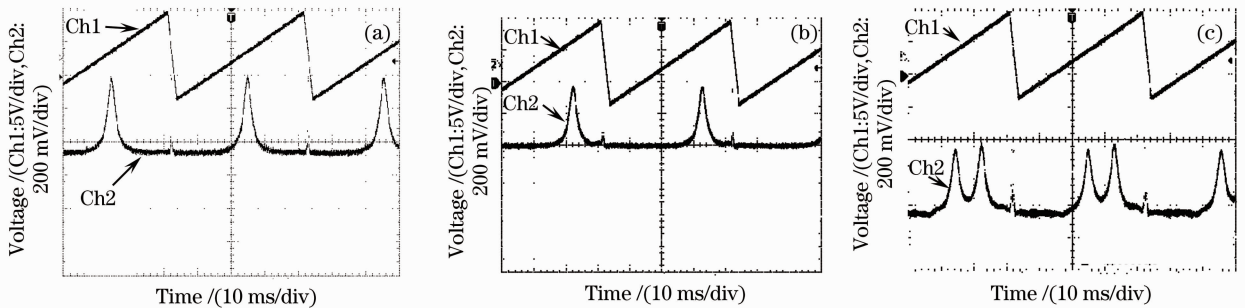


图 4 双向输出的环形腔扫描光谱图。(a) CCW 方向；(b) CW 方向；(c)CCW-CW 方向

Fig. 4 Scanning spectra of bidirectional fiber ring cavity. (a) CCW; (b) CW; (c) CCW-CW direction

图 5 为 CW 和 CCW 的激光输出功率随抽运功率的增大而改变。在未达到抽运阈值 10 mW 之前,两路均未起振,为微弱的荧光,之后功率迅速增加,单路的功率转换斜率效率约为 2%。试验中发现在抽运功率不大的情况下(仍在阈值之上),CW 和 CCW 方向的激光可以较稳定地独立振荡,并保持在

单纵模状态;当抽运功率大于 25 mW 时,两路激光开始出现多模状态,同时由于双向竞争的加剧,双向激光之间的功率差异将持续增大。其原因一方面是光路中的器件参数不是完全对称,同时滤波器器件的偏振态控制并非理想,残余背向反射造成激光之间能量互相耦合,使得双向激光的行为有所差异;另一

方面, 试验中滤波器所采用的 FBG 带宽相对于纵模间隔仍然很大, 在功率加大之后会产生跳模、多模现象, 可考虑与其他的选模器件相结合, 进一步提高双向激光的稳定性。

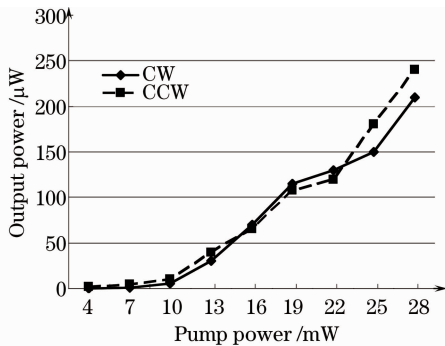


图 5 输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5 Output power versus pump power

4 结 论

提出了一种基于 FBG 的双向滤波器结构, 分析了滤波器偏振分离的工作原理, 并简单介绍了器件的制作过程和测试参数, 滤波器的插入损耗约为 3 dB, 背向散射损耗比大约为 35 dB, 最后进行双向激光输出的试验验证。在光纤环形腔中接入滤波器, 使用 3.5 m EDF 获得了抽运阈值 10 mW, 斜率效率约为 2% 的双向单纵模激光, 从实际试验上确定了该滤波器的可行性, 在进一步完善之后, 可用在陀螺中提高双向激光束的质量。

参 考 文 献

- Zeng Qinghua, Liu Jianye, Lai Jizhou *et al.*. Newest developments of ring laser gyro[J]. *J. Transducer Technology*, 2004, **23**(11): 1~4
曾庆化, 刘建业, 赖际舟等. 环形激光陀螺的最新发展[J]. 传感器技术, 2004, **23**(11): 1~4
- Wang Jinlin, Chen Ming, Han Rongjiu. Optical polishing and test technology of superpolishing mirror substratum for laser gyroscope[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003, **39**(2): 5~9
王金林, 陈明, 韩荣久. 激光陀螺超光滑反射镜基片的光学加工和检测技术[J]. 航空精密制造技术, 2003, **39**(2): 5~9
- Zhang Wen, Jin Shilong. Light path stabilization for ring laser gyroscope[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2006, **14**(1): 72~78
张文, 金龙世. 激光陀螺光路稳定技术的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, **14**(1): 72~78
- Hu Zongfu. Effects of residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1924~1929

- 胡宗福. 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1924~1929
- Liu Dewen, Xiao Wen, Wei Bo. Mechanism of radiation effects on fiber optic gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 419~422
刘德文, 肖文, 魏博. 光纤陀螺受辐照影响机理分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 419~422
- S. K. Kim, H. K. Kim, B. Y. Kim. Er³⁺-doped fiber ring laser for gyroscope applications[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(22): 1810~1812
- Roman Kiyon, Seung Kwan Kim, B. Y. Kim. Bidirectional single-mode Er-doped fiber-ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12): 1624~1626
- Roman Kiyon, Byoung Yoon Kim. An Er-doped bidirectional ring laser with 90° Faraday rotator as phase nonreciprocal element[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3): 340~342
- Jingren Qian, Jue Su, Xuxu Wang *et al.*. Er-doped fiber ring laser gyroscopes operating in continuous waves[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 229~231
- Peng Jiande, Chen Xiaopeng, Liu Xiaoming *et al.*. Bi-directional simultaneous single-longitudinal mode lasing of a Er³⁺-doped all-fiber ring laser using composite cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1412~1416
彭江得, 陈晓鹏, 刘小明等. 复合腔全光纤环形激光器单纵模双向同时激射的实验研究 [J]. 光学学报, 1998, **18**(10): 1412~1416
- Zhang Ming, Chen Shufen, Fu Lei *et al.*. Experimental research of a fiber ring laser gyroscope [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, **29**(1): 44~46
张明, 陈淑芬, 付雷等. 光纤激光陀螺的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, **29**(1): 44~46
- Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635
饶云江, 周昌学, 冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 631~635
- Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 350~353
伍波, 刘永智, 张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 350~353
- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(4): 420~430
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(4): 420~430
- John Canning. Fibre gratings and devices for sensors and lasers [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2008, **2**(4): 275~289
- K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 267~276
- H. C. LeFevre. Single mode fibre fractional wave devices and polarization controllers [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(20): 778~780