

双向振荡的偏振分离型光纤激光陀螺

饶范钧 陈淑芬 付 雷 邹正峰

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 提出了一种基于偏振分离型滤波器结构的光纤激光陀螺,并分析了其双向的工作原理和产生频差的条件。其中的偏振分离型滤波器在双向滤波的同时还可用于调节两束激光的能量耦合强度。抽运激光的功率超过 10 mW 阈值时,环形腔中可产生双向振荡的单纵模激光,其拍频频率可通过滤波器在 50 kHz~1.5 MHz 范围内连续地调节。在设定拍频频率为 70 kHz 时对陀螺进行旋转测试,得到了拍频频率随陀螺转速呈线性变化的曲线。

关键词 光纤光学;光纤激光陀螺;偏振分离;双向单纵模;能量耦合

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0406001

Bidirectional Oscillations in Fiber Ring Laser Gyroscope with Polarization Splitting Filter

Rao Fanjun Chen Shufen Fu Lei Zou Zhengfeng

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

Abstract A type of fiber ring laser gyroscope based on a polarization splitting filter is presented, and its principle of bidirectional operation and the generation of beat frequency is analyzed. The mode energy coupling can be adjusted by controlling the filter. When the pump power exceeds 10 mW, bidirectional single-mode oscillations can be achieved, and the beat frequency can be switched from 50 kHz to 1.5 MHz by filter control. Finally, a linear frequency-rotation response curve of the gyroscope with the initial beat frequency set at 70 kHz is obtained.

Key words fiber optics; fiber ring laser gyro; polarization splitting; bidirectional single longitudinal mode; energy coupling

OCIS codes 060.2370; 060.3510; 140.3370

1 引 言

在现代惯性测量系统中,陀螺仪的性能是至关重要的因素。以 He-Ne 气体为腔内增益介质的激光陀螺可以做到很高的精度,因而被应用在航空航天等尖端领域,然而其固有特点(需要解决气体密封、镀制高反射膜等)决定了它的工艺复杂且价格昂贵^[1,2]。为了降低成本和工艺难度,国内外展开了相关的研究,致力于采用固体的增益介质来代替气体增益介质,期望在减小体积和简化结构的同时保持高精度的角速度测量。

目前,固体增益介质的激光陀螺主要有 S. Schwartz 等^[3]报导的基于双向连续运转的 Nd:

YAG 环行腔固体激光器和 S. Sunada^[4]采用的半导体光放大器为增益介质的环形腔以及使用掺铒增益光纤构成的双向输出的光纤环形腔激光器,在这一类型陀螺中,K. Kiyan 等^[5]进行过环形腔互易性的研究,钱景仁等^[6]采用非互易性结构也获得了陀螺转速与拍频的曲线。

激光陀螺为了获得角速度的信息,腔内需要维持一正一反两个方向的激光振荡,同时由于萨尼亚克(Sagnac)效应,正反两束激光的频差变化反映了陀螺的转速。与 He-Ne 气体增益介质的加宽类型(非均匀多普勒加宽)不同,固体增益介质为均匀加宽,不同方向激光的耦合强烈,其陀螺的研究难点之

收稿日期: 2010-08-04; **收到修改稿日期**: 2010-11-03

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: raofanjun@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

一在于降低两个方向激光的模式竞争,在同一谐振腔内产生独立、稳定的双向窄线宽激光^[7,8]。本文在掺铒光纤环形腔中,对双向振荡的激光采用偏振分离式的滤波,在滤波和维持振荡的过程中控制双向激光之间的能量耦合,可输出独立双向的单纵模激光,同时得到两个方向激光的拍频,拍频频率的变化与陀螺转速呈线性关系。

2 原理与结构

激光陀螺本质上是一个处于双向振荡的环形激光器,然而两个方向的激光同时存在一个腔中很容易引起空间烧孔现象和两束激光能量的耦合,导致激光的双向振荡不稳定,呈多纵模输出。在两方向激光模式竞争激烈的情况下,一个方向的激光甚至受到完全的抑制,变成一个单向振荡的环形激光器。与此同时,激光器工作物质的不同影响了获得双向振荡的难度。传统的激光陀螺是气体介质,是多普勒效应为主的非均匀加宽,同时添加 He-Ne 气体同位素来消除模式竞争。而固体增益介质的加宽类型为均匀加宽,其双向激光之间的耦合强烈,因而模式竞争比气体介质更加剧烈,这造成了固体增益介质的激光器很难同时产生双向振荡^[7,9]。因此,一个固体掺铒光纤激光陀螺要处于稳定的双向工作状态,就需要在滤波的同时控制两束激光的能量耦合以降低模式竞争。

图 1 采用的结构是基于一个掺铒的光纤环形腔激光器,腔中采用偏振分离的方法并结合光纤光栅对双向激光进行滤波,并可通过调节滤波器控制双向激光能量耦合的大小,在获得稳定振荡的双向单

纵模激光输出后,实现了与旋转速度呈线性变化的拍频信号。

接有偏振分离滤波器的光纤激光陀螺的原理图如图 1 所示。激光器的有源部分采用 980 nm 抽运的掺铒增益光纤。偏振分离的滤波器部分包括两个起偏器(其偏振方向分别为水平和垂直)、偏振分束器(PBS)、45°放置的 λ/4 波片延迟器和用作滤波器件的窄带光纤布拉格光栅(FBG)。FBG 是一种良好的波长选择器件,被广泛应用于多种场合^[10~12]。为了使 FBG 这种单端口的反射型器件可以工作在双向状态,本文的滤波器采用了偏振态分离的方法区分双向的激光。

在滤波器部分,当顺时针(CW)或逆时针(CCW)方向的激光从某一端口穿过偏振器 P_∥ 或 P_⊥ 后变成线偏振光后,进入 PBS 的 3 端口,此时两个方向的偏振态相互垂直。FBG 的反射作用与呈 45°放置的 λ/4 波片延迟器将双向激光的偏振态各旋转 90°,这样水平偏振态旋转为垂直偏振态,或反之。由于 PBS 的偏振分束特性,偏振态旋转后的 CW 或 CCW 方向激光就可以从滤波器的另一端口输出。可以证明波片延迟器在理想的 45°和 λ/4 延迟条件下,滤波器不会带来双向的能量耦合^[8]。

在不考虑双向激光的能量耦合的情况下,如果环形腔沿某一方向(CW)的传输用琼斯矩阵表示为 **A** 的话,由于环形腔中不含有非互易性器件(比如法拉第器件),则沿另一方向的传输可表示为 **A**^T。于是双向激光在腔中传播的本征方程可写为

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{E}_{CW} = \lambda_{CW}\mathbf{E}_{CW} \\ \mathbf{A}^T\mathbf{E}_{CCW} = \lambda_{CCW}\mathbf{E}_{CCW} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 **E**_{CW} 和 **E**_{CCW} 分别是沿 CW 和 CCW 方向传播的电场矢量,λ_{CW} 和 λ_{CCW} 是对应的本征值。解上述方程可得到两个方向电场与传输本征值的关系:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{CW,j} = \mathbf{E}_{CCW,j}^* \\ \lambda_{CW,j} = \lambda_{CCW,j} \\ j = 1, 2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中上角标“*”为复共轭符号,j 表示每个传输矩阵对应两个电场矢量和本征值。由于本征值 λ 是个复数,它包含了激光传播完整一周回到原地时的振幅和相位信息,因而决定了激光的衰减和振荡频率。两个方向的本征值 λ_{CW} 和 λ_{CCW} 相同意味着在没有背向散射等能量耦合的情况下,CW 与 CCW 方向的激光频率应当相同。以上情况是在元器件理想、双向激光没有发生能量耦合的条件下。下面用传输矩阵来描述 λ/4 波片的旋转角度被调整后,其双折射

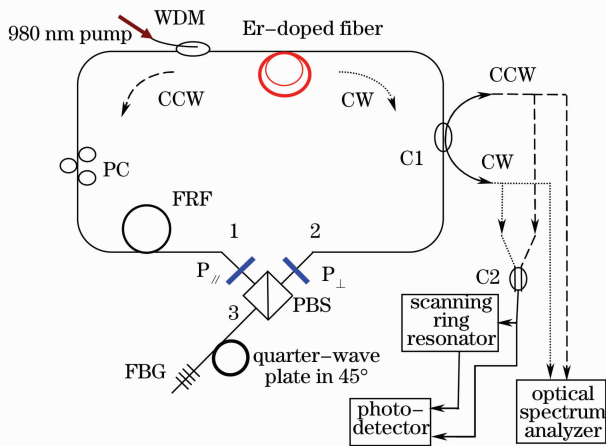


图 1 偏振分离型光纤激光陀螺原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization-splitting fiber laser ring gyroscope

改变而造成的影响(包括透射和背向反射)。

考虑沿某一方向传播的激光,它先后经过偏振器 $P_{//}$, PBS, $\lambda/4$ 波片, FBG, $\lambda/4$ 波片, PBS, 再从另一边的偏振器 P_{\perp} 输出后绕环形腔一周。假设在只考虑波片调整造成的偏差情况下,用琼斯矩阵描述波片等器件的传输特性,水平偏振器 $P_{//}$ 和垂直偏振器 P_{\perp} , 其矩阵写为

$$P_{//} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_{\perp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

在空间中偏离理想 45° 位置 θ 的旋转矩阵 R 可表示为

$$R = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ + \theta) & \sin(45^\circ + \theta) \\ -\sin(45^\circ + \theta) & \cos(45^\circ + \theta) \end{bmatrix},$$

式中 θ 是偏振面被调整而偏离理想位置的角度。

$\lambda/4$ 的波片可用矩阵表示为

$$D_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix},$$

FBG 可写为

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

于是最终透射的矩阵 T 可写为

$$T = P_{\perp} R(45^\circ + \theta) D_{\lambda/4} M \cdot D_{\lambda/4} R(45^\circ + \theta) P_{//}. \quad (3)$$

另一方面,由于波片调整造成的双折射,造成激光偏振态不能理想地翻转 90° , 使部分的光强被 PBS 送回到原来的偏振器 $P_{//}$ 入射端口,形成主要的背向反射,其反射矩阵 R 可描述为

$$R = P_{//} R(45^\circ + \theta) D_{\lambda/4} M D_{\lambda/4} \cdot R(45^\circ + \theta) P_{//}. \quad (4)$$

最终 T 和 R 在环形腔中造成的透射和反射随着 $\lambda/4$ 波片偏转角度调整的变化如图 2 所示。

于是,器件制作误差造成的背向反射使得激光

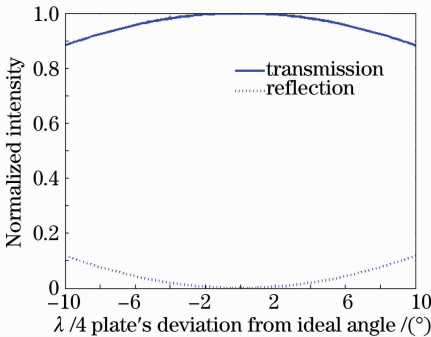


图 2 波片的角度调整造成透射和背向反射发生的变化

Fig. 2 Wave-plate's angle adjustment versus transmission and back-reflection intensity

在腔内的光学元件与有源增益介质中产生能量耦合。双向能量的交换使得 CW 和 CCW 激光原来一致的频率发生分裂,于是在环形腔没有旋转的情况下这两束激光也能产生一个初始频差。这种现象在双向振荡的半导体、Nd:YAG 等固体增益介质激光器和染料激光器中可以观察到^[3,4,13],而在 He-Ne 气体的环形腔激光器(加宽线型为非均匀的多普勒加宽)中则不明显。在能量耦合程度较小,即波片小角度偏离理想状态条件下,频率分裂产生的频差 Δf_0 与耦合强度的关系可写为

$$\Delta f_0 = \frac{\Delta\omega_0}{2\pi} \approx \frac{c\sqrt{\gamma}}{n_0\pi L}, \quad (5)$$

式中 γ 是引起耦合的背向反射强度系数 ($\gamma \ll 1$), c 是光速, n_0 和 L 分别是介质折射率和环形腔腔长。由上式可看出频差 Δf_0 与耦合量强度和腔的光学参数有关。如果调整 $\lambda/4$ 波片偏离理想位置的角度,则可以人为地改变的 γ 大小,即腔内的双向激光耦合量,进而改变初始状态的频差,这一点可以在后面的试验中得出。而较大改变波片角度偏离过大,会改变偏振滤波部分的透过率,甚至导致某一方向激光被抑制消失。

3 实验测试

3.1 器件参数

实验的结构按照图 1 所示。整个环形腔长度约为 10 m,其相邻纵模间隔估算为 21 MHz。增益介质是一段 3.5 m 的铒纤,其铒离子原子数分数为 9×10^{-4} , 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。铒纤经过 980/1550 nm 的波分复用器(WDM),由一个 980 nm 的半导体激光器(LD)光源抽运。制作图 1 结构中的滤波器部分时,两个偏振器用保偏光纤和 PBS 相连;用于反射滤波的 FBG 是在低双折射的光纤上写入的,3 dB 的反射带宽为 0.1 nm,反射率约为 90%。 $\lambda/4$ 波片是由 FBG 剩余的尾纤部分绕制,再与 PBS 的 3 端口的保偏光纤熔接后扭转 45° 。

光路中还插入一个光纤环滤波器(FRF)用作激光纵模稳定性的微调,把一个 2×2 光纤耦合器上的两条腿(属于同一条光纤)连起来焊成一个小环,其腔长为 19 cm,其梳状滤波的频率间隔约为 1 GHz,这样利用小环的谐振腔的梳状滤波特性可以对整个光路进一步滤波。

在整个结构的光路接通之前,先调整滤波器部分并经过静态测试^[8],确保其双向的透射损耗和背

向反射调整到最低。光路的输出部分用一个 90:10 的耦合器将输出的双向激光引到腔外的探测器,如图 1 所示。

3.2 双向单纵模与拍频

经测试,整个环形腔的抽运阈值约为 10 mW,超过阈值后环形腔中开始产生双向激光。输出的 CW 和 CCW 分别用光谱仪观察,均处于振荡状态,且两束激光光谱的中心位置均位于 FBG 的光谱反射区内,约 1549.87 nm。

为了进一步观察激光的纵模结构,把两个方向的输出接入一个光纤扫描环形腔。扫描环形腔由压电陶瓷(PZT)驱动,其腔长约为 1 m,扫描的带宽由腔长决定,可按公式 c/nL 估计(c 是光速, n 为腔介质折射率, L 是环形腔的长度),约为 200 MHz;腔的精细度由腔内损耗决定,约为 30。于是可得到:扫描环形腔分辨率等于扫描带宽与精细度的比值,即 $200/30$,约为 6 MHz 这个数值小于多纵模的间隔(大于 21 MHz),足以分辨出多纵模的状态。

纵模扫描如图 3 所示。上方的锯齿波是加在 PZT 上的扫描电压,下方曲线的波峰与周围的纹波是扫描到的激光纵模结构。可以看出,在一个完整的扫描周期中只有一个波峰存在,而周围的细小纹波则是由 CW 和 CCW 的激光相互拍频造成的。在光谱仪证明两方向均处于振荡状态的情况下,而扫描图上只呈现出一个 CW-CCW 波峰;事实上这是由于两方向的激光纵模的频率挨得很近(图 4),以至于各自的尖峰互相重叠,扫描环形腔的分辨率有限而识别不出来。

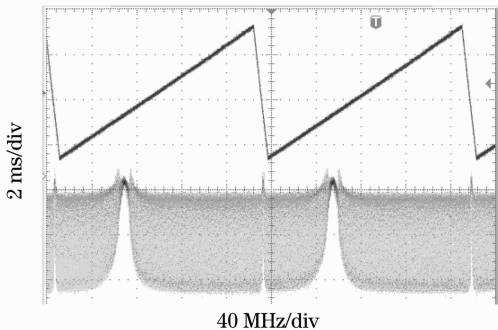


图 3 CW-CCW 方向输出的激光纵模扫描图

Fig. 3 Mode scanning image of CW-CCW lasers

同时,实验中也确认两路激光没有多纵模的拍频现象,即探测器上没有出现纵模间隔(21 MHz)整数倍的频率。于是,两路振荡状态激光输出的光谱,以及图 3 的双向纵模结构图和图 4 中单一的双向拍频可以说明 CW 和 CCW 两方向的激光都处于单纵

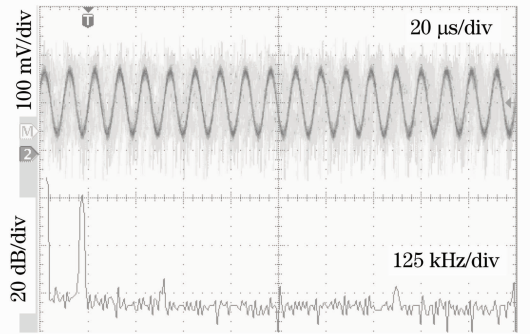


图 4 两路激光 CW-CCW 的拍频信号

Fig. 4 CW-CCW beat signal of the bidirectional lasers
模振荡状态。

另一方面,当环形腔中的光纤环滤波器被去掉时,可以清楚地看到图 5 上出现的多纵模现象:存在多个尖峰,且急剧跳变,这与尖锐稳定的单纵模波峰有很大不同。

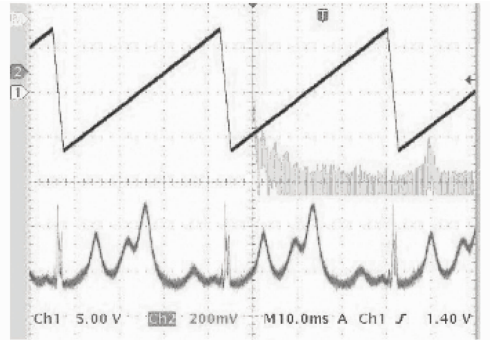


图 5 去掉光纤环滤波器后的多纵模现象

Fig. 5 Multimode scanning image when FRF is taken off

将 CW,CCW 激光直接合束拍频,其测得的频率与图 3 中细小纹波的频率一致,均为双向单纵模激光拍频的频率,如图 4 所示。上方的正弦曲线显示了拍频信号,下方则是对应的频谱分布。可看出双向激光拍频频率约为 100 kHz,这个频率虽然无法在图 3 的纵模扫描图(其分辨率约 6 MHz)中分辨出重叠波峰,但可以看到它引起的细小纹波,并且进一步用频谱仪观测如图 4 所示。

为了验证(5)式,可以微调滤波器中的 $\lambda/4$ 的波片延迟器。当调整波片的角度时可以连续地改变图 4 中的拍频频率,从几十千赫兹至 1.5 MHz 左右。值得注意的是,拍频频率的变化只能通过调整 $\lambda/4$ 的波片,进而改变双向激光的能量耦合量来获得;调整环形腔中的偏振态(利用偏振控制器 PC)只能同时地改变 CW 和 CCW 激光的功率和拍频信号的幅值,而无法改变频率。这也说明了双向激光经历了相同的变化;拍频信号是由双向激光的能量耦合所引起。按照(5)式,当腔长为 10 m,拍频频率为

100 kHz时,可计算得 γ 约为 2×10^{-4} 。

当调整波片角度加大耦合量时,拍频频率变大,但幅值逐渐减小至消失。如果波片偏离理想的角度过大,则会影响双向激光的透射率和光强变化(图2),直至某一方向激光被抑制消失,双向激光变成单方向振荡的激光器;与此相反,实验中发现,当调整波片减小初始拍频频率小于一定数值时(约 50 kHz),单一的拍频开始出现多次谐波,并逐渐趋于不稳定状态。图6所示是基频为 30 kHz 的多次谐波现象。可能的原因是 CW 和 CCW 的激光频率逐步接近到一定程度时,在有源区的掺铒光纤中形成了增益和折射率的周期性扰动即增益光栅^[9,14],从另一方面加剧激光在有源区的能量耦合,从而影响了拍频信号的稳定。

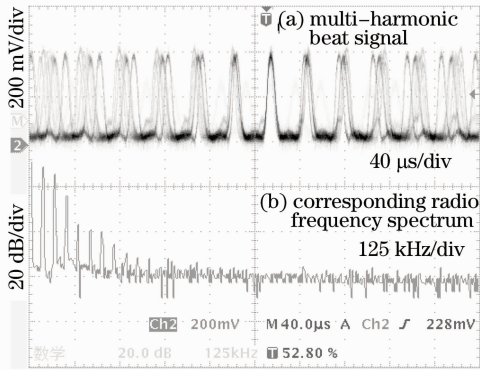


图6 调整初始拍频小于一定数值时出现的多次谐波现象

Fig. 6 Observations of a multi-harmonic beat signal when initial beat frequency is tuned below certain value

3.3 旋转实验

在环形腔进行旋转测试前,调整 $\lambda/4$ 的波片延迟器,把拍频信号确定在频率稳定、幅值较大的 70 kHz。抽运的 980 nm 光功率为 20 mW, CW 和 CCW 方向的光功率分别 110 μ W 和 140 μ W。信号频率随旋转速率变化的曲线图如图7所示。可以看出在转速较高时,频率随转速变化的线性度较好,而在转速较低区域,频率随转速变化的非线性较大。可能的原因与双向激光的能量耦合导致的非线性有关:转速较大时,旋转引起 Sagnac 效应所产生的频差占据主要成分,因而受初始频差带来的非线性影响较小;而转速较小时, Sagnac 效应所产生的频差所占成分较小,双向激光的能量耦合引起的非线性影响就大。

4 结论

本文提出了一种基于掺铒增益光纤的激光陀螺,分析了其结构和双向工作原理,并检测了双向激

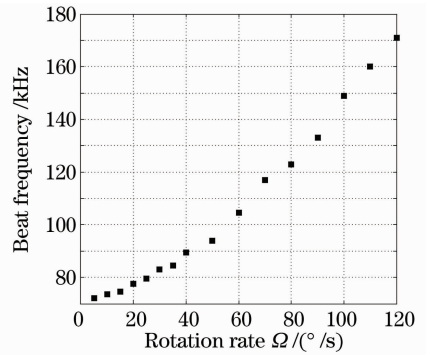


图7 拍频频率随陀螺转速的变化曲线图

Fig. 7 Beat frequency versus gyro-cavity rotation rate
光输出的单纵模特性,得到了陀螺的拍频信号,其拍频频率可用滤波器进行调节,最后进行陀螺的旋转测试,得到了拍频信号随转速的变化特性曲线。经过改进后,这个结构可用于进一步研究固体增益陀螺的双向激光特性。

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
- Sylvain Schwartz, Gilles Feugnet, Philippe Bouyer. Mode-coupling control in resonant devices: application to solid-state ring lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(9): 093902
- Satoshi Sunada, Shuichi Tamura, Kezo Inagaki *et al.*. Ring-laser gyroscope without the lock-in phenomenon [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **78**(5): 053822
- 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
- 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光的实验研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(10): 1412~1416
- Rao Fanjun, Chen Shufen, Fu Lei. Bidirectional filter using polarization splitting in fiber laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1692~1696
饶范钧,陈淑芬,付雷. 用于光纤激光陀螺的偏振分离型双向滤波器[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1692~1696
- A. E. Siegman, Lasers [M]. University Science Books, Mill Valley, CA, 1986
- Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng. Narrow bandwidth add/

- drop channel filter based on fiber bragg grating assisted coupler fabricated by fused taper technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1537~1541
- 江微微, 李 坚, 赵瑞峰等. 熔锥法制作光纤光栅辅助型窄带上下话路滤波器[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1537~1541
- 11 Gu Zhengtian, Jiang Xiuli, Zhao Xiaoyun. Filter characteristics of phase-shifted long period fiber grating with film coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 633~637
- 顾铮, 蒋秀丽, 赵晓云. 镀膜相移长周期光纤光栅滤波特性 [J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 633~637
- 12 Li Songbai, Deng Tao, Wu Jiagui. Output characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041402
- 李松柏, 邓 涛, 吴加贵. 光纤光栅外腔半导体激光器的输出特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041402
- 13 R. Centeno Neelen, R. J. C. Spreeuw, E. R. Eliel *et al.*. Frequency splitting of the longitudinal modes of a ring dye laser due to backscattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(5): 959~969
- 14 S. J. Frisken. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(24): 1776~1778