

文章编号: 0258-7025(2008)08-1208-06

双环形腔复合瑞利后向散射式光纤转动传感特性

刘艳磊 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 基于 A. Kung 等所提出的后向瑞利(Rayleigh)散射式光纤转动传感原理,提出了一种双环形腔复合的 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器(RBFORS)新结构。利用两个 2×2 单模光纤耦合器,建立了复合双环形腔 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的理论模型。通过计算机仿真,给出了用光时域反射计(OTDR)探测到的光纤转动传感器输出信号的特性,利用优化的环长和分光比两结构参量,分析了模拟结果。选择双环的长度分别为 1500 m 和 1078 m, 2×2 光纤耦合器的耦合系数分别为 95.23% 和 94.88% 构建了测试系统,对不同转速所探测到的 Rayleigh 后向散射信号进行测量,得到了实验结论与理论相一致的结果。双环的采用,提高了测量信号的强度,增加了测试的有效数据,使其更有利于识别,提高了转速测量的精度。

关键词 传感器; 光纤转动传感器; Rayleigh 后向散射; 双环形腔; 光时域反射计

中图分类号 TP 212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1208

Characteristic of Compound Two-Ring Combined Rayleigh Backscattering Fiber Optic Rotation Sensing

Liu Yanlei Yuan Libo

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel compound two-ring combined Rayleigh backscattering fiber optic rotation sensor (RBFORS) is demonstrated and simulated based on the working principle given by A. Kung. The theoretical model of the two-ring resonators combined RBFORS is established by using two 2×2 fiber star couplers. The output signal characteristics of optical time domain reflectometer (OTDR) are deduced and analyzed by optimizing the structure parameters of the two rings cavity lengths and coupling ratios. The experiment system is constructed by the two-ring with the lengths of $L_1 = 1500$ m and $L_2 = 1078$ m and fiber couplers with the coupling ratios of $k_1 = 95.23\%$ and $k_2 = 94.88\%$, respectively. The Rayleigh backscattering signals are measured at different rotation rates. The experimental results are agreement with the theoretical prediction. The measurement intensity is increased by utilizing the compound two-ring structure. Therefore, the valid data number is increased, which is helpful to identify and enhance the precision of the measurement rotation rate.

Key words sensors; fiber optic rotation sensor; Rayleigh backscattering; two-ring resonators; optical time domain reflectometer

1 引言

光纤转动传感器在科学实验和工业生产中,用于检测目标相对于某一轴转动的角速度,同传统的静电及纯光路的转动传感器相比具有结构简单、抗振动冲击能力强、精度高、成本低、质量轻、功耗低、

易于集成化等优点^[1~4]。利用其优越性,使人们能够在各种苛刻条件下,对转动物体的角速度进行高精度的测量^[5]。

基于单模光纤单环形腔的后向散射特性,A. Kung 等^[6]于 1997 年首次提出了瑞利(Rayleigh)后

收稿日期:2007-09-29; 收到修改稿日期:2007-12-21

基金项目:国家自然科学基金(60577005)资助项目。

作者简介:刘艳磊(1979—),女,回族,辽宁人,讲师,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: liuyanleilyl@126.com

导师简介:苑立波(1962—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事光纤智能结构方面的研究。

E-mail: lbyuan@vip.sina.com

向散射式光纤转动传感器方案。2007 年, 文献[7]分析了不同腔长的两个后向散射环串接时的光纤转动传感器特性。在此基础上, 本文提出了一种双环形腔复合的 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器 (RBFORS) 新结构。建立了复合双环形腔 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的理论模型, 基于单环后向 Rayleigh 散射式光纤转动传感器原理, 推导出了散射信号强度的表达式。在理论和实验上分别给出了不同结构参量的转动传感器信号输出特性, 并在同一坐标系中对比了单环和双环复合光纤转动传感器对信号响应的区别。

2 工作原理

双环形腔复合的 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的工作原理是建立在单模光纤环形腔中的

Rayleigh 后向散射信号对转动的响应特性基础上的, 该新结构利用 2 个单模光纤 2×2 耦合器组成复合双环, 其基本结构如图 1 所示。

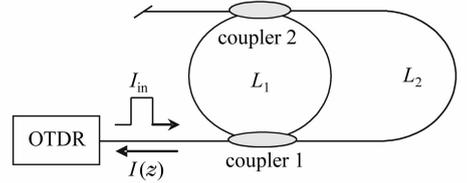


图 1 复合双环 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的基本结构

Fig. 1 Schematic description of the compound two-ring combined Rayleigh backscattering fiber optic rotation sensor

单环后向 Rayleigh 散射式光纤转动传感器的输出强度为^[6]

$$I(z) = I_{in} R(z) (1-k)^2 \xi^2 (k \xi)^{\frac{z}{L} - \frac{3}{2}} \exp(-\alpha z) \frac{k \xi \sin^2 \left[\beta L \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L} + \frac{1}{2} \right) \right] + \sin^2 \left[\beta L \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L} - \frac{1}{2} \right) \right]}{\left(\beta L \frac{n}{c} \chi v \right)^2}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, n 为光纤媒质的折射率, χ 为斐索 (Fizeau) 牵引系数, I_{in} 为光时域反射计 (OTDR) 输入的探测光脉冲强度, β 为传播常数, k 为耦合器的强度耦合系数, ξ 为光纤耦合器的附加损耗, $R(z)$ 为瑞利后向散射的光强系数, α 为光纤衰减系数, L 为光纤环形腔长, z 为光信号总的传输距离, v 为光纤环转动线速度。使用 Rayleigh 后向散射的光纤转动传感器的光纤环形腔长可取几百米, 可增加由于环旋转引起的 Sagnac 相移^[8]。

设两个光纤环形腔腔长分别为 L_1, L_2 , 两个光纤 2×2 耦合器的耦合系数分别为 k_1, k_2 , 附加损耗分别为 ξ_1, ξ_2 , 耦合器 1 的偏振损耗分别为 η_{11}, η_{12} , 耦合器 2 的偏振损耗分别为 η_{21}, η_{22} 。OTDR 输入探测光脉冲强度为 I_{in} , 经单模光纤 2×2 耦合器 1 探测光脉冲强度被分成两部分。其中一部分进入环形腔 1,

强度为 $(1-k_1)\xi_1\eta_{12}I_{in}$, 另一部分进入环形腔 2, 强度为 $k_1\xi_1\eta_{11}I_{in}$ 。进入环形腔 1 总的探测光脉冲包括直接经 2×2 耦合器 1 耦合到环形腔 1 的光脉冲和耦合到环形腔 2 并在其中传播多圈后又耦合到环形腔 1 的光脉冲, 环形腔 1 中的总的探测光脉冲在散射点产生 Rayleigh 后向散射, 一部分经耦合器 1 直接传回到 OTDR, 另一部分在环形腔 1 中传播多圈后回到 OTDR。进入环形腔 2 总的探测光脉冲包括直接经 2×2 耦合器 1 耦合到环形腔 2 的光脉冲和在环形腔 1 中传播多圈后又耦合到环形腔 2 的光脉冲, 环形腔 2 中的总的探测光脉冲在散射点产生 Rayleigh 后向散射, 一部分经耦合器 1 直接传回到 OTDR, 另一部分在环形腔 1 中传播多圈后回到 OTDR。OTDR 探测到的散射信号强度为环形腔 1 和环形腔 2 散射信号的非相干叠加。

进入环形腔 1 总的探测光脉冲的强度为

$$I'_{in} = (1-k_1)\xi_1\eta_{12}I_{in} + I_{in}k_1\xi_1\eta_{11}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}k_1\xi_1\eta_{11}\exp(-\alpha L_2) \sum_{p=0}^{\infty} [(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{21}]^p \exp(-\alpha p L_2) = (1-k_1)\xi_1\eta_{12}I_{in} + \frac{k_1\xi_1\eta_{11}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}k_1\xi_1\eta_{11}}{\exp(\alpha L_2) - (1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}} I_{in}. \quad (2)$$

环形腔 1 的探测光脉冲在散射点产生 Rayleigh 后向散射, 传回到 OTDR 的光信号强度为

$$I_1(z) = I_{in} R(z) (k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21})^{\frac{z}{L_1} - \frac{3}{2}} \exp(-\alpha z) \left[(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} + \frac{k_1 \xi_1 \eta_{11} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22} k_1 \xi_1 \eta_{11}}{\exp(\alpha L_2) - (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22}} \right]^2 \times \frac{k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21} \sin^2 \left[\beta L_1 \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \right] + k_2^2 \xi_2^2 \eta_{21}^2 \sin^2 \left[\beta L_1 \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L_1} - \frac{1}{2} \right) \right]}{\left(\beta L_1 \frac{n}{c} \chi v \right)^2} \quad (3)$$

进入环形腔 2 总的探测光脉冲的强度为

$$I''_{in} = I_{in} k_1 \xi_1 \eta_{11} + I_{in} (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} k_2 \xi_2 \eta_{21} (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} \exp(-\alpha L_1) \sum_{p=0}^{\infty} (k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21})^p \exp(-\alpha p L_1) = \left[k_1 \xi_1 \eta_{11} + \frac{(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} k_2 \xi_2 \eta_{21} (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12}}{\exp(\alpha L_1) - k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21}} \right] I_{in} \quad (4)$$

环形腔 2 的探测光脉冲在散射点产生 Rayleigh 后向散射, 传回到 OTDR 的光信号强度为

$$I_2(z) = \left[k_1 \xi_1 \eta_{11} + \frac{(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} k_2 \xi_2 \eta_{21} (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12}}{\exp(\alpha L_1) - k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21}} \right]^2 \times I_{in} R(z) [(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22}]^{\frac{z}{L_2} - \frac{3}{2}} \exp(-\alpha z) \times \frac{(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22} \sin^2 \left[\beta L_2 \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L_2} + \frac{1}{2} \right) \right] + (1 - k_2)^2 \xi_2^2 \eta_{22}^2 \sin^2 \left[\beta L_2 \frac{n}{c} \chi v \left(\frac{z}{L_2} - \frac{1}{2} \right) \right]}{\left(\beta L_2 \frac{n}{c} \chi v \right)^2} \quad (5)$$

OTDR 探测到的总的光信号强度为

$$I(z) = I_1(z) + I_2(z) \quad (6)$$

3 参量优化模拟

对图 1 所示的光纤转动传感器模型进行参量优化模拟, 模拟时选择的基本参量如表 1 所示。

表 1 模拟的参量数据表

Table 1 Parameters of simulation data sheet

Parameters	Value
Attenuation of optical fiber α / (dB/km)	0.3125
Wavelength of light λ / nm	1310
Refractive index of single mode fiber n	1.468
Propagation constant β / μm^{-1}	7.036
Coupling coefficient of the fiber coupler 1 k_1 / %	95.23
Coupling coefficient of the fiber coupler 2 k_2 / %	94.88
Cavity length of fiber ring 1 L_1 / m	1500
Cavity length of fiber ring 2 L_2 / m	1078
Excess loss of fiber coupler 1 ξ_1 / dB	0.05
Excess loss of fiber coupler 2 ξ_2 / dB	0.05
Polarization degree loss of fiber coupler 1 η_{11} / dB	0.01
Polarization degree loss of fiber coupler 1 η_{12} / dB	0.03
Polarization degree loss of fiber coupler 2 η_{21} / dB	0.01
Polarization degree loss of fiber coupler 2 η_{22} / dB	0.03
Vacuum velocity of light c / (m/s)	3×10^8
Fizeau drag first-order correction factor χ	0.536
Radius of fiber ring R / m	0.08

选择表 1 中的参量, 光纤环形腔的转速 ω 分别为 0 rad/s, 0.1 rad/s, 0.19 rad/s 时, Rayleigh 后向

散射信号的强度如图 2 所示。

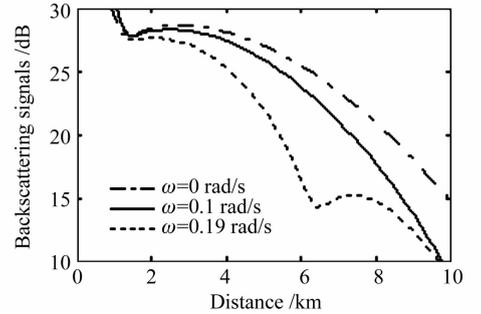


图 2 不同转速情况下双环 L_1 和 L_2 复合的仿真结果
Fig. 2 Simulation results of the compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 at different rotation rates

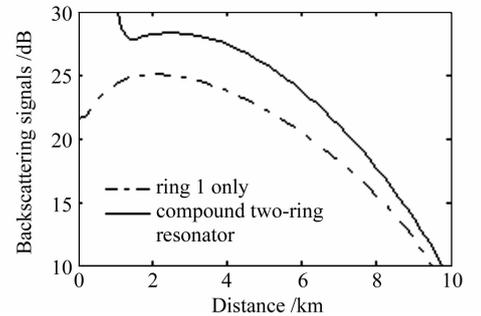


图 3 在转速为 0.1 rad/s 的情况下, 只有环 1 和双环 L_1 和 L_2 复合的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of only ring 1 and compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 at rotation rate = 0.1 rad/s

光纤环形腔的转速 ω 为 0.1 rad/s 时,对比只有光纤环 L_1 和双环复合 Rayleigh 后向散射信号的强度曲线如图 3 所示。

由仿真结果可知,当光纤转动传感器进行旋转时,光纤环形腔内顺时针方向传播的探测光信号与逆时针方向传播的 Rayleigh 后向散射光信号的速度将由于相对论效应而发生改变,从而导致 OTDR 获得的光纤环形腔的后向散射曲线波形包络的变化,根据(6)式对 OTDR 曲线进行拟合计算及插值处理,可以获得转动传感器旋转的角速度信息。

比较单环 L_1 和双环 L_1, L_2 复合的仿真结果可知,将双环复合,由于提高了耦合器输出端的利用率,增加了 Rayleigh 后向散射光信号的强度,并且在一定的动态范围内,双环的测试距离要大于单环。因此,在测量时可以选脉宽较小的光脉冲,提高 OTDR 所测强度曲线的精度;在测量远距离处的散射强度时,双环复合的光纤转动传感器可以给出更精确的值;在一定的测试距离范围内,双环的采用增加了所测试的后向散射光信号强度的有效数据,可提高计算转速的精度。

3.1 分光比优化模拟

选择耦合器的耦合系数分别为 $k_1 = 0.9523, k_2 = 0.9488; k_1 = 0.8264, k_2 = 0.8166; k_1 = 0.6742, k_2 = 0.6826$ 。 $\omega = 0.1$ rad/s, $L_1 = 1.500$ km, $L_2 = 1.078$ km, Rayleigh 后向散射信号的强度如图 4 所示。

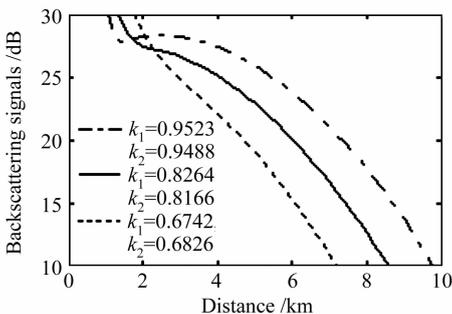


图 4 不同分光比时双环 L_1 和 L_2 复合的仿真结果

Fig.4 Simulation results of the compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 at different coupling ratios

由仿真结果可知,耦合器的分光比发生变化时,曲线的陡峭程度发生变化,曲线的形状基本没有发生变化。连接光纤环的耦合端分得的光强越多, Rayleigh 后向散射信号的强度曲线相对平坦。在一定的动态范围内,选择耦合系数大的光纤耦合器可以增加测试距离。

3.2 环形腔长优化模拟

选择耦合器的耦合系数分别为 $k_1 = 0.9523, k_2 = 0.9488, \omega = 0.1$ rad/s, $L_1 = 1.260$ km, $L_2 = 0.623$ km; $L_1 = 1.500$ km, $L_2 = 1.078$ km; $L_1 = 2.050$ km, $L_2 = 1.420$ km, Rayleigh 后向散射信号的强度如图 5 所示。

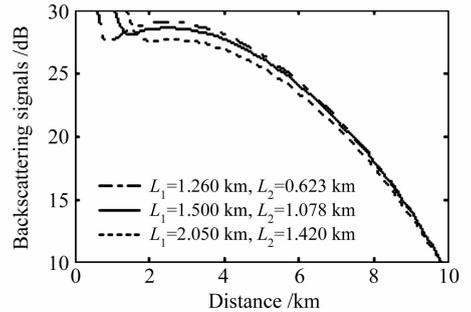


图 5 不同环长时双环 L_1 和 L_2 复合的仿真结果

Fig.5 Simulation results of the compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 with different cavity lengths of fiber ring

由仿真结果可知,光纤的环长发生变化时,曲线的陡峭程度发生变化。光纤环的长度越长时, Rayleigh 后向散射信号的强度曲线越平坦。在固定的动态范围内,光纤环的长度越长时,探测的强度曲线的扫描距离越大。

4 测量系统和测试结果

双环形腔复合的 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的装置如图 6 所示。



图 6 复合双环 Rayleigh 后向散射式光纤转动传感器的实验装置

Fig.6 Experimental setup of the compound two-ring combined Rayleigh backscattering fiber optic rotation sensor

测量系统包括步进电机驱动器,转台,光纤环形腔(2个), 2×2 光纤耦合器(2个),单膜光纤, AV3662A 型光时域反射计。

测量系统中双环的长度分别为 1500 m 和 1078 m, 2×2 光纤耦合器 1 和 2 的分光比分别为 95.23%:4.77% 和 94.88%:5.12%,附加损耗都为 0.05 dB,光纤耦合器 1 和 2 的偏振损耗都为

0.01 dB和0.03 dB,光纤环的直径为16 cm,双环被固定在步进电机控制器的控制转台上。实验中OTDR用激光二极管(LD)产生光脉冲的波长为1310 nm,脉冲宽度为4000 ns,量程为10 km。调节步进电机的转速 ω 取值分别为0 rad/s,0.1 rad/s,0.19 rad/s,OTDR追踪得到的后向散射信号的强度如图7所示。

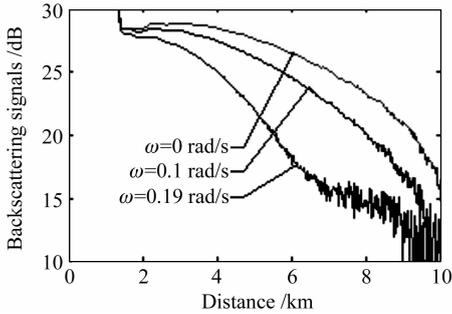


图7 在不同转速情况下,OTDR探测双环 L_1 和 L_2 复合的强度曲线

Fig. 7 OTDR traces of the compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 at different rotation rates

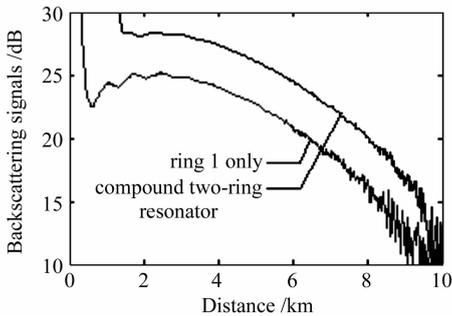


图8 在转速为0.1 rad/s情况下,OTDR探测环1和双环 L_1 和 L_2 复合的强度曲线

Fig. 8 OTDR traces of only ring 1 and compound two-ring resonator with the lengths of L_1 and L_2 at rotation rate=0.1 rad/s

光纤环形腔的转速 ω 为0.1 rad/s时,只有光纤环 L_1 和双环复合Rayleigh后向散射信号的强度曲线如图8所示。

从实验结果可以看出,OTDR追踪得到的后向散射信号的强度与理论上计算得到的强度曲线完全一致,因此,在未知转速的情况下,测得后向散射信号的强度曲线,可以用理论上推导的Rayleigh后向散射信号的强度表达式来计算转速。

同时,从单环 L_1 和双环 L_1, L_2 复合的测量比较结果可知,理论上对双环复合的光纤转动传感器的预测得到了印证。双环的采用,提高了Rayleigh后向散射光信号的强度,在一定的测试距离范围内,增

加了所测试的后向散射光信号强度的动态范围及测试的有效数据,可改进拟合过程中转速测量的精度。

图9给出了测量得到的转速值同实际的转速值的比较曲线。由图9可知,测量的最大误差为4.34%,最小误差为0.15%。证明了双环复合Rayleigh后向散射式光纤转动传感器测量转速的可行性。

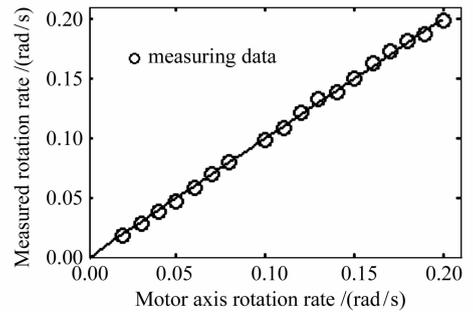


图9 使用(6)式获得的测量转速同实际转速的比较
Fig. 9 Measured rotation rate using fitting of Eq. (6) as a function of the actual rotation rate

5 结 论

提出了一种双环形腔复合的Rayleigh后向散射式光纤转动传感器新结构。通过理论计算和仿真得出,光纤耦合器的分光比与光纤环形腔的长度均对Rayleigh后向散射信号的输出强度产生影响,即对旋转角速度 ω 的测量产生影响,而光纤耦合器分光比的变化对系统测量的影响要大一些。

实验对不同转速对应的Rayleigh后向散射信号的强度进行了测量,用数值拟合方法获得转动传感器的转速,得到了实验和理论相一致的结果。

将双环形腔复合后构建的Rayleigh后向散射式光纤转动传感器,其输出特性曲线与单环的相比有一定的优越性。双环的采用,提高了Rayleigh后向散射光信号的强度,可以更精确地测量出远距离处的散射强度;并且在一定的测试距离范围内,增加了测试的有效数据,使其更有利于识别,提高了转速测量的精度。

参 考 文 献

- David C. O'Carroll, Patrick A. Shoemaker, Russell S. A. Brinkworth. Bioinspired optical rotation sensor [C]. *SPIE*, 2007, **6414**:641418
- E. N. Bazarov, V. P. Gubin, A. I. Sazonov *et al.*. Fiber optic rotation sensor based on recirculating ring interferometer with an intracavity erbium-doped fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2006, **6251**:62510Q
- Yang Zhihui, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):814~819
杨志怀,马慧莲,郑阳明等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁

- 频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(6):814~819
- 4 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1140~1144
米剑,张春熹,李铮等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(8):1140~1144
 - 5 Ma Shanjun, Robert C. Gauthie. One and two dimensional reflective fiber optic displacement and tilt sensors [J]. *J. Jiangxi Normal University*, 2000, **24**(2):167~171
马善钧,Robert C. Gauthie. 一维和二维反射式光纤位移和转动传感器[J]. 江西师范大学学报, 2000, **24**(2):167~171
 - 6 A. Kung, J. Budin, L. Thevenaz *et al.*. Rayleigh fiber optic gyroscope [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7):973~975
 - 7 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang. Rayleigh backscattering fiber optic rotation sensor based on combined two-ring-resonator [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **136**:216~220
 - 8 A. Kung, J. Budin, L. Thevenaz *et al.*. Optical fiber ring resonator characterisation by optical time-domain reflectometry [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(2):90~92

征稿简则

《中国激光》是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所共同主办,科学出版社出版的学术期刊,国内外公开发行。

1. 刊登内容

主要发表我国科技人员在激光理论与技术领域的最新进展,栏目包括:综述、实验技术与元件、激光物理与化学、全息技术、光束传输、光通信及其元器件、光纤元件、测量技术、材料、薄膜、激光应用、激光生物学与医学,等等。请作者在来稿中注明所投栏目,并注明所属中图分类号。

2. 投稿与查询

本刊接受 Email 投稿或网络投稿,投稿邮箱:submit@siom.ac.cn,网络投稿与查询:登录中国光学期刊网 www.opticsjournal.net。来稿请注明作者真实姓名、服务单位、详细通信地址、联系电话、邮政编码及电子信箱。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 Email 发出收稿通知。作者投稿 2 个月内未收到本刊处理意见,可另投他刊。但需事先告知本刊编辑部。编辑部有权对来稿删改。来稿请勿涉及保密内容,并提供相关单位证明。来稿请附所有作者签名,作者顺序一经确定,请勿任意删改。可同时提供 6~8 位国内外同行专家的详细通讯方式和研究领域,供送审时参考。

3. 来稿要求

3.1 文字要求

来稿应含中英文题目、摘要、关键词和第一作者简介,全文要求在 5000 字以内。来稿请用小 4 号,1.5 倍或 2 倍行距,另用不同颜色标明文内尤其公式中易混淆的大小写、上下角码、文种、算符等。计量单位一律采用国家标准 GB3100-3102-93 规定,摘要和正文中的缩略词在第一次出现时都必须写出全称,后附缩略词。

3.2 标题与摘要

标题应言简意赅,字数控制在 20 字以内,不使用不公开的外文缩写词(化学符号除外)。中英文摘要请用第三人称叙述,不使用“本文”或“作者”等主语,不引用参考文献、数学公式和化学式。内容应包括四个要素:即研究目的、方法、结果、结论。中英文摘要内容应基本对应,中文摘要 300 字左右,英文摘要 150~180 个单词。

3.3 关键词

每篇论文应给出 4~8 个关键词,第一个列出该文主要工作或内容所属的二级学科名称,第二个列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称,第三个列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称,第四个列出在前三个关键词中没有出现的,但作为主要研究对象的事或物质的名称,如有需要,还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

3.4 图表

要求设计美观,大小适中,尺寸一般不小于 5 cm×7 cm,线条均匀,主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。图题、表题须中英文对照,图面、表面一律采用英文。

3.5 参考文献

应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文献为英文,请用英文表示,如原文献为其他文种,请译成英文,在该文献最后用括号注明,如原为日文,则用(in Japanese),如原文献为中文,则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下:专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名),文献题名,版本(专著用),出版地:出版者,出版年,起止页码;期刊[J]——作者(三名),论文题目[J],刊名,出版年,卷(期),起止页码;专利[P]——专利申请者,专利题目[P],专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;文集[C]——作者(三名),论文题目[C],编者,论文集名,出版地:出版者,年,起止页码。

3.6 基金资助、作者简介

论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。作者简介(含导师简介)应给出姓名(出生年一),性别,籍贯,民族(汉族可省略),职称,学历,研究方向,Email。

4. 收费

本刊遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿件作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

5. 版权

录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册,抽印本 10 份。

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和中国光学期刊网,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

特别声明:凡已在国内外正式出版物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再另行声明。

本刊在办刊过程中,得到了社会各界的大力协助,谨致谢忱。
《中国激光》编辑部