

doi:10.3788/gzxb20184705.0506005

光纤陀螺磁温耦合效应

陈一平, 梁瑾, 张登伟, 杨建华, 车双良, 刘承

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:提出了磁场和温度场共同作用下光纤陀螺产生磁温耦合效应的理论,建立了相应的数学模型,并对该模型进行仿真分析和实验验证.理论、仿真和实验结果表明,光纤陀螺产生的磁温交叉耦合度来自于磁场产生的非互易圆双折射、不同温度下光纤环上热应力导致的双折射、光纤固有双折射、弯曲双折射等的相互作用.在 $20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的范围内,保偏光纤直径为 $250\ \mu\text{m}$,拍长为 $3\ \text{mm}$,光纤长度为 $1\ 600\ \text{m}$,光纤扭转率为 $1\ \text{rad/m}$,光源波长为 $1\ 550\ \text{nm}$, $1\ \text{mT}$ 径向磁场产生的磁温交叉耦合度的最大值为 6.796% .

关键词:光纤陀螺;磁温耦合效应;磁温交叉耦合度;非互易相位差;保偏光纤线圈

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0506005-6

Magnetic-temperature Coupling Effect of a Fiber Optic Gyroscope

CHEN Yi-ping, LIANG Cui, ZHANG Deng-wei, YANG Jian-hua, CHE Shuang-liang, LIU Cheng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A theory for magnetic-temperature coupling effect generated in a Fiber Optic Gyroscope (FOG) under the combined action of magnetic and temperature fields was proposed. The magnetic-temperature coupling in FOG originates from the interaction of the magnetic field, fiber twist, birefringence caused by thermal stress, and the intrinsic and bending birefringence of the fiber. The cross-coupling changes with temperature. When the polarization maintaining fiber has a diameter of $250\ \mu\text{m}$, beat length of $3\ \text{mm}$, length of $1\ 600\ \text{m}$, twist rate of $1\ \text{rad/m}$, and optical source wave length of $1550\ \text{nm}$, the maxim degree of magnetic-thermal coupling generated by a $1\ \text{mT}$ radial magnetic field within the temperature range of 20°C to 60°C is 6.796% .

Key words: Fiber Optic Gyroscope (FOG); Magnetic-temperature coupling effect; Degree of magnetic-temperature coupling; Nonreciprocal phase error; Polarization Maintaining (PM) fiber coil

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.2800

0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的新型角速度传感器,具有全固态结构、大动态、高带宽、低功耗、抗冲击、小体积、快启动等突出优点^[1-2],是现代航空、航海、航天和国防等领域中广泛使用的一种惯性导航仪器^[3-4].近年来,光纤陀螺通过工艺改进,在敏感环设计、信息处理器设计、光路设计、模型解算研究等方面取得了长足的进步,其在温度、磁场等单独环境适应性方面也取得了重大突破,如 BOHM K 提出了光纤陀螺磁场敏感性的理论,指出磁光法拉第效应是磁致误差的根源^[5];SAIDE T 等首次提出了采用宽谱光源的去偏光纤陀螺径向磁致误差的理论^[6];SHUPE D M 指出温度梯度变化时光纤换上的非互易性相位误差是影响光纤

基金项目:国家自然科学基金(No.61203190),浙江省自然科学基金(No.LY17F030010),NQI 专项,航天支撑基金资助

第一作者:陈一平(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤陀螺、捷联惯性技术.Email: cyp0901@zju.edu.cn

通讯作者:杨建华(1971-),男,工程师,硕士,主要研究方向为光纤传感技术.Email: xxianhua@zju.edu.cn

收稿日期:2018-01-19; **录用日期:**2018-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

陀螺性能的重要因素^[7];FRIGON J 提出了光纤环四级对称绕制方法来抑制 Shupe 效应误差^[8].但在温度、磁场等两种或多种环境同时存在时,光纤陀螺应用精度严重恶化,限制了光纤陀螺的使用,其中研究磁场、温度两种物理场同时作用下,光纤陀螺产生磁温耦合的机理,建立磁场温度耦合影响光纤陀螺的模型,是研制高精度光纤陀螺、提升光纤陀螺的复杂环境适应性的前提^[9-10].

在磁场作用下,干涉式光纤陀螺由于磁光 Faraday 效应产生非互易相位差,光纤敏感线圈是陀螺磁漂移的主要来源^[11].与光纤陀螺敏感轴垂直的径向磁场 B_R 作用下,光纤陀螺产生的非互易相位差 $\Delta\phi_F$ 来自于绕城线圈后光纤的双折射、光纤的扭转及磁场产生的 Faraday 圆双折射的综合作用,所产生的非互易相位差 $\Delta\phi_F$ 与光纤的双折射 $\Delta\beta$ 、光纤的扭转率 φ 、光纤长度 L 及磁场 B_R 密切相关^[12-14].制成线圈后,保偏光纤的双折射 $\Delta\beta$ 来自于光纤拉制过程中自身应力带来的双折射 $\Delta\beta_0$ 、光纤横截面非圆对称带来的双折射 $\Delta\beta_1$ 、光纤线圈绕制时拉力产生的双折射 $\Delta\beta_2$ ^[15]、光纤绕制时弯曲带来的双折射 $\Delta\beta_3$ ^[16],光纤线圈绕制完毕后,如果外界温度不变,则线圈上光纤的双折射 $\Delta\beta = \Delta\beta_0 + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\beta_3$ 、光纤的扭转率 φ 、光纤长度 L 也不变,因此,径向磁场 B_R 确定时,产生的非互易相位差 $\Delta\phi_F$ 也是确定的.当外界温度变化时,在不同温度点上光纤膨胀不同,同时光纤线圈的骨架与光纤的材料不同,热膨胀系数也不同,这样使得线圈中任意小段上光纤受到附加的热应力 σ_T ^[17].热应力 σ_T 与光纤自身应力相似,同样能产生双折射 $\Delta\beta_T$,热应力 σ_T 在光纤线圈上的规律分布,导致热应力双折射 $\Delta\beta_T$ 也是规律分布的,记为 $\Delta\beta_T(i)$, $\Delta\beta_T(i)$ 随外界温度 T 的变化而变化.热应力双折射 $\Delta\beta_T(i)$ 叠加在光纤固有双折射 $\Delta\beta$ 上,光纤内形成新的双折射分布 $\Delta\beta'(i)$.当没有磁场 B_R 时,这种双折射的改变对光纤陀螺具有一定的非互易性,通过光学补偿方法可以大幅度减小^[18],当存在 B_R 时,光纤陀螺产生较大的非互易相位差,且随着温度 T 的变化而变化,给光纤陀螺带来磁温耦合非互易相位差 $\Delta\phi_{F-T}$.本课题组基于保偏陀螺系统,深入研究了磁温交叉耦合的机理,并进行了仿真分析和实验验证.

1 光纤陀螺磁温耦合的理论

如图 1 所示的光纤陀螺系统,径向磁场 B_R 平行于光纤线圈平面,光纤线圈由直径为 $250\mu\text{m}$ 的保偏光纤绕制,光纤线圈平均直径为 D ,光纤从 1# 端口到 2# 端口的长度为 L ,将光纤平均分成 m 段,每段光纤长度为 δz ,则 $\delta z \cdot m = L$,对于顺时针(Clockwise, CW)光,设从端口 1# 开始的第 i 段光纤上的固有双折射为

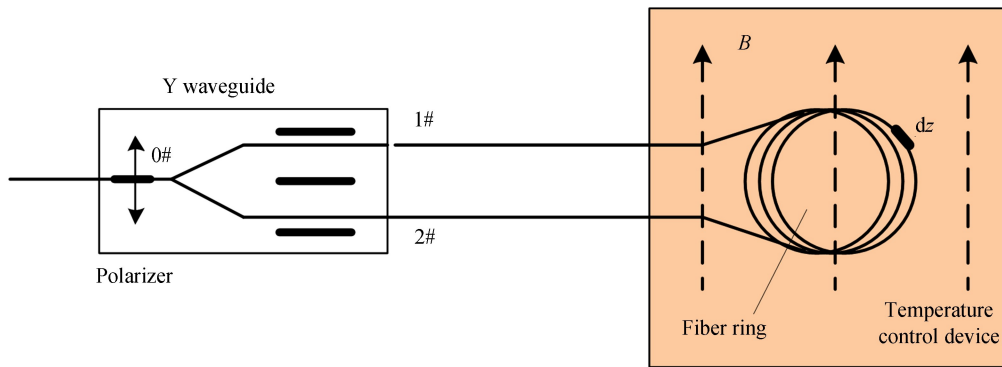


图 1 磁温作用下的光纤陀螺系统

Fig.1 Fiber optic gyroscope system under magnetic-temperature effect

$\Delta\beta(i)$ 、扭转率为 $\varphi(i)$ 、温度 T 下光纤由于热应力产生的双折射为 $\Delta\beta_T(T, i)$,而径向磁场 B_R 在第 i 段光纤上产生的圆双折射为 $\zeta(i) = B_R V \sin(i\delta z/r)$,则 CW 光在第 i 段光纤上的传输矩阵为^[12]

$$\mathbf{u}_{c,i} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_{c,i}\delta z) - j \frac{\Delta\beta'(i)}{2\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}\delta z) & - \frac{[\varphi(i) + \zeta(i)]}{\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}\delta z) \\ \frac{[\varphi(i) + \zeta(i)]}{\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}\delta z) & \cos(\eta_{c,i}\delta z) + j \frac{\Delta\beta'(i)}{2\eta_{c,i}} \sin(\eta_{c,i}\delta z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\Delta\beta'(i) = \Delta\beta(i) + \Delta\beta_T(T, i)$, $\eta_{c,i} = \sqrt{[\Delta\beta'(i)/2]^2 + [\varphi(i) + \zeta(i)]^2}$.因此, CW 光从端口 0#, 经过端口 1#、端口 2#, 重新回到端口 0# 时,传输矩阵为

$$\mathbf{U}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \prod_{i=m-1}^0 \mathbf{u}_{c,i} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

而对于逆时针(Counter-clockwise,CCW)光,在第*i*段光纤上的传输矩阵为

$$\mathbf{u}_{cc,i} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_{cc,i}\delta z) - j \frac{\Delta\beta'(i)}{2\eta_{cc,i}} \sin(\eta_{cc,i}\delta z) & - \frac{[\varphi(i) - \zeta(i)]}{\eta_{cc,i}} \sin(\eta_{cc,i}\delta z) \\ \frac{[\varphi(i) - \zeta(i)]}{\eta_{cc,i}} \sin(\eta_{cc,i}\delta z) & \cos(\eta_{cc,i}\delta z) + j \frac{\Delta\beta'(i)}{2\eta_{cc,i}} \sin(\eta_{cc,i}\delta z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\Delta\beta'(i) = \Delta\beta(i) + \Delta\beta_T(T, i)$, $\eta_{cc,i} = \sqrt{[\Delta\beta'(i)/2]^2 + [\varphi(i) - \zeta(i)]^2}$. 因此,CCW 光从端口 0#, 经过端口 2#, 端口 1#, 重新回到端口 0# 时, 传输矩阵为

$$\mathbf{U}_{cc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \prod_{i=0}^{m-1} \mathbf{u}_{cc,i} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此,当外界温度为 T 时,径向磁场 B_R 作用下,光纤陀螺产生的相位差漂移^[5]为

$$\Delta\phi_{F,T} = \frac{j \text{tr}(\mathbf{U}_c \mathbf{U}_{cc}^\dagger - \mathbf{U}_c^\dagger \mathbf{U}_{cc})}{\text{tr}(\mathbf{U}_c \mathbf{U}_{cc}^\dagger + \mathbf{U}_c^\dagger \mathbf{U}_{cc})} \quad (5)$$

式中, \mathbf{U}_x^\dagger 表示 \mathbf{U}_x 的厄密共轭矩阵, $\text{tr}(\mathbf{T})$ 表示矩阵 \mathbf{T} 的迹.

在不同温度 T 下,光纤线圈内部的第 i 段光纤中受到的热应力双折射 $\Delta\beta_T(i)$ 不同,因此,径向磁场 B_R 产生的非互易相位差也不同,设环境温度为 $T = 20^\circ\text{C}$ 时,径向磁场对光纤陀螺产生的非互易相位差为 $\Delta\phi_{F,20}$, 则任意温度 T 下磁场与温度共同作用下产生的磁温交叉耦合相位差为

$$\Delta\phi_{F-T} = \Delta\phi_{F,T} - \Delta\phi_{F,20} \quad (6)$$

而磁温交叉耦合度为

$$k_{F,T} = (\Delta\phi_{F,T} - \Delta\phi_{F,20}) / \Delta\phi_{F,20} = \Delta\phi_{F-T} / \Delta\phi_{F,20} \quad (7)$$

磁温交叉耦合度反映了磁场、温度两种物理场作用下,光纤陀螺产生交叉耦合的程度,在一定程度上表示了光纤陀螺的多物理场环境适应性.由于光纤环在不同温度下产生的应力不同,而且热应力分布非常复杂,没有一个比较简单的表达式,本研究使用有限元方法对光纤环上热应力进行仿真,然后计算得到产生的双折射分布,再将热应力产生的双折射分布代入式(5)计算磁温共同作用下,光纤陀螺产生的非互易相位差,再根据式(7)得到不同温度下的磁温交叉耦合度.

2 仿真及实验

如图 2 所示,设光纤线圈为四极对称绕制方法,光纤环骨架为铝制材料,厚度为 5 mm,光纤环半径 $R = 50$ mm,光纤环高度为 30 mm,光纤为石英光纤,光纤对于波长为 1 550 nm 的光的拍长为 3 mm,直径为 250 μm ,长度为 1 600 m,光纤扭转率为 1 rad/m.当光纤环绕制成如图 2 所示的绕制方法时,当温度变化时,光纤环的每层光纤将产生复杂的应力,这种应力的存在产生一附加双折射,该附加双折射叠加在保偏光纤固

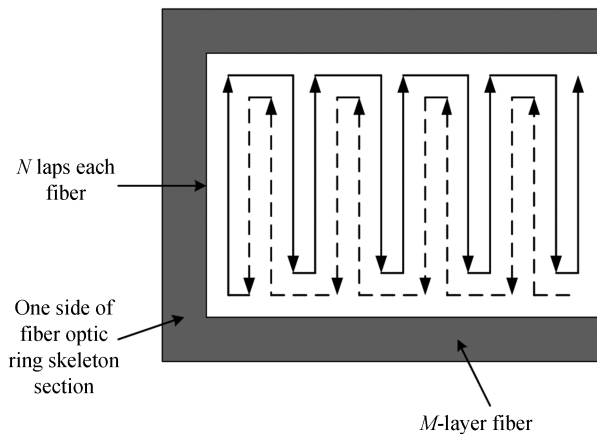


图 2 四极对称绕制光纤线圈一半的剖面图

Fig.2 Profile of half of a quadrupole winding fiber coil

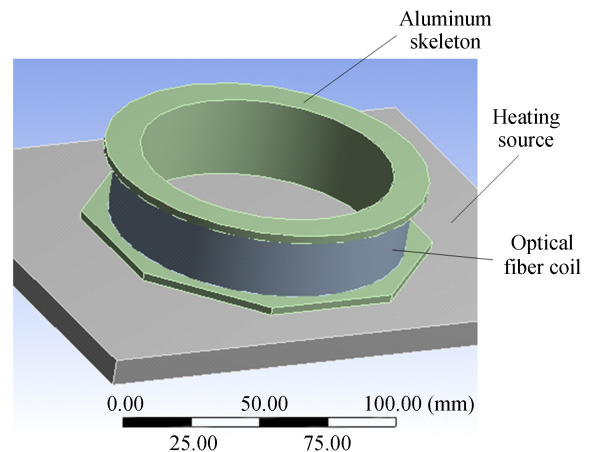


图 3 有限元仿真模型

Fig.3 The finite element simulation model

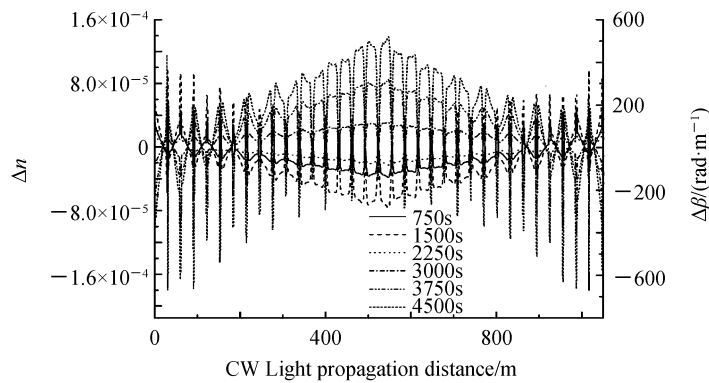


图4 不同温度下顺时针方向光纤上双折射分布

Fig.4 Birefringence distribution on clockwise optical fiber at different temperatures

有双折射上,使得保偏光纤固有双折射产生微小改变,当存在磁场时,磁场产生的圆双折射与叠加后的光纤中的双折射相互作用,光在光纤中传播时,其偏振态发生一定的偏振演化,产生一定的漂移,这种漂移就是热应力产生的附加双折射和固有双折射叠加在一起与磁场产生的圆双折射相互作用的结果,该漂移是温度产生的漂移与磁产生的漂移的代数和与两种物理场同时存在时产生的漂移的差值,称为磁温交叉耦合漂移.图3是加热状态下的有限元仿真模型,加热源与铝制骨架紧密接触,位于铝制骨架的下面.图4是起始温度为20℃,分别在20℃、30℃、40℃、50℃、60℃温度点下,CW方向不同长度光纤上热应力致双折射 $\Delta\beta_T(T, i)$ 分布的仿真结果.可以看到,不同温度下,光纤线圈内光纤长度上由于温度而产生的折射率改变为 10^{-4} ,对应的双折射为600rad/m,而拍长为3mm的保偏光纤,其固有双折射为 2×10^3 ,因此光纤陀螺存在一定的磁温耦合度.

为了验证本文提出的数学模型的正确性,搭建了光纤长度为1635m、光纤环直径为100mm、放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源的中心波长为1556nm、光纤拍长为3mm的光纤陀螺系统,图5是磁温交叉耦合实验系统,图6是保偏光纤环,将保偏光纤环放置于磁温交叉耦合实验系统,将磁场方向与光纤陀螺径向敏感轴大致平行.

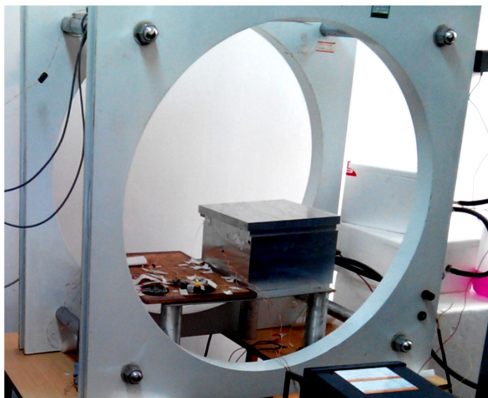


图5 磁温实验系统

Fig.5 Magnetic-temperature test system



图6 光纤线圈

Fig.6 Optical fiber coil

在温度范围为 $+20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$,温度变化速率为 $6^{\circ}\text{C}/\text{h}$,磁场大小为1mT的静磁场环境下,测量光纤陀螺磁温交叉耦合度与温度及磁场的关系.将不同温度下光纤上热应力致双折射 $\Delta\beta_T(T, i)$ 及光纤固有双折射 $\Delta\beta$ 之和 $\Delta\beta'(i)$ 代入式(5),分别得到不同温度下的光纤陀螺径向磁场 B_R 产生的非互易相位差,再通过式(7)计算得到光纤陀螺磁温交叉耦合度 $k_{F,T}$,实验结果和模拟结果如图7和表1所示,可以看到实验结果与仿真结果具有较好的一致性.

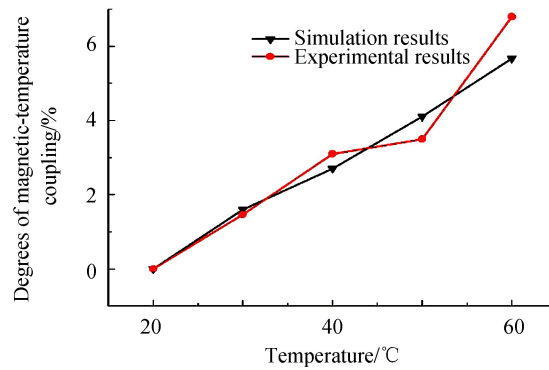


图7 不同温度下光纤陀螺磁温交叉耦合度仿真和实验结果

Fig.7 Simulation and experimental results of magnetic-temperature coupling of fiber optic gyroscopes at different temperatures

表1 不同温度下光纤陀螺磁温交叉耦合度仿真和实验结果

Table 1 Simulation and experimental results of magnetic-temperature coupling of fiber optic gyroscopes at different temperatures

Temperature / °C	Gyro zero bias- no magnetic field /(° · h ⁻¹)	Gyro zero bias-10 Guass magnetic field/(° · h ⁻¹)	Magnetic field sensitivity /(° · h ⁻¹ · 10 ⁻¹ Guass ⁻¹)	Simulation results/%	Experimental results/%
20	7.567	4.021	3.546	0	0
30	7.663	4.065	3.598	1.596	1.467
40	7.676	4.02	3.656	2.701	3.102
50	7.661	3.991	3.67	4.102	3.497
60	7.686	3.899	3.787	5.670	6.796

3 结论

与光纤陀螺敏感轴垂直的径向磁场作用下,光纤陀螺产生非互易相位差,该非互易相位差在不同温度下具有比较明显的变化,原因在于不同温度下,光纤上具有不同的热应力,该热应力与保偏光纤本身的应力类似,都能够对保偏光纤产生双折射,热应力改变后的双折射与光纤扭转及磁场相互作用,给光纤陀螺带来非互易相位差,本文着重研究不同温度下光纤陀螺由于径向磁场产生的非互易相位差与温度的依赖关系,用磁温耦合度来表示,它反映了光纤陀螺在磁-热两种物理场作用下的环境适应性,对于光纤陀螺环境适应性的性能提高具有一定的理论指导意义,本文提出的理论模型、仿真结果均适用于消偏光纤陀螺系统,但由于保偏光纤和消偏光纤本身的应力相差较大,因此在磁-热两种物理场作用下产生磁温耦合的大小并不相同,不同之处主要来自于磁温耦合误差与光纤本身的应力密切相关,在计算两种不同的光纤陀螺时只需将光纤本身的应力产生的双折射代入本文的磁温耦合模型,就能分别得到不同类型光纤陀螺的磁温耦合致相位差的大小,本文的研究成果对高精度光纤陀螺的研制能够提供理论指导意义。

参考文献

- [1] TAN Xi, LIU Jun, YIN Jian-ling. Magnetic sensitivity of FOG in DC and alternating magnetic fields [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39** (9): 101-106.
谭曦, 刘军, 殷建玲. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(9):101-106.
- [2] LLOYD S W, FAN S, DIGONNET M J F. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(13):2079-2085.
- [3] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [4] 王庆国,曲兆明,刘军等. 光纤陀螺磁屏蔽结构. CN 103884328 [P]. 2014.
- [5] SAIDA T, HOTATEK. General formula describing drift of interferometer fiber-optic gyro due to faraday effect: reduction of the drift in twin-depo-I-FOG[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17** (2) :222-228.
- [6] JOHN G M, DANIEL A T. High efficiency magnetic shield for a fiber optic gyroscope: U.S. Patent 5896199[P].1999.
- [7] SHUPE D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(5):654.
- [8] FRIGO N J. Compensation of linear sources of non-reciprocity in sagnac interferometers[C]. *Fiber Optic and Laser Sensors I*. International Society for Optics and Photonics, 1983, **0412**(6) :268-271.
- [9] ZHENG Hua, ZHENG Yong-qiu, AN Pan-long, et al. Effect of input intensity fluctuation of fiber ring resonator on

resonator fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(11): 1122002.

郑华, 郑永秋, 安盼龙, 等. 光纤环形谐振腔输入功率波动对谐振式光纤陀螺的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(11): 1122002.

- [10] BOHM K, PETERMANN K. Sensitivity of a fiber-optic gyroscope to environmental magnetic fields[J]. *Optics Letters*, 1982, **7** (4) :180-182.
- [11] LEFEVRE H. The fiber-optic gyroscope[M]. London: Artech house, 1993.
- [12] HOTATE K, TABE K. Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: influence of the earth's magnetic field[J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(7):1086-1092.
- [13] CELIKEL O, SAMETOGLU F. Assessment of magneto-optic Faraday effect-based drift on interferometric single-mode fiber optic gyroscope (IFOG) as a function of variable degree of polarization (DOP) [J]. *Measurement Science & Technology*. 2012, **23**(2):1-17.
- [14] UDD E. Magnetic field sensitivity of depolarized fiber opticgyros[C]. SPIE, 1991, **1367**:81-86.
- [15] FINI J M. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area[J].*Optics Express*, 2006, **14**(1):69-81.
- [16] KARIMIM, SUN T, GRATTAN K T V. Design evaluation of a high birefringence single mode optical fiber-based sensor for lateral pressure monitoring applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(11):4459-4464.
- [17] ULRICH R. Fiber-optic rotation sensing with low drift[J]. *Optics Letters*, 1980, **5**(5):173-175.
- [18] YANG Y, WANG Z, LI Z. Optically compensated dual-polarization interferometric fiber-optic gyroscope[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(14):2841-2843.