

文章编号: 1001-3806(2016)02-0245-05

四频差动激光陀螺法拉第片最佳入射角的研究

锁高洁, 邱复生*, 宋凯

(西安交通大学 理学院, 西安 710049)

摘要: 为了探究入射光偏振态对四频差动激光陀螺法拉第片最佳入射角的影响, 建立四频差动激光陀螺法拉第片三光束干涉的琼斯矩阵, 利用计算机进行数值计算, 模拟圆偏振光和椭圆偏振光在陀螺仪内的传播方程, 并通过搜索不同入射角情况下 $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内磁圆二向色性差分损耗的振幅最小值来选取最佳入射角。结果表明, 圆偏振模式下和椭圆偏振模式下法拉第片的最佳入射角有一定差别, 这种差别足以影响到激光陀螺仪的测量精度, 因此在安装法拉第片时应考虑入射光偏振态对其最佳入射角的影响; 此外, 法拉第片的最佳入射角与入射光 s 分量(垂直于入射面)、 p 分量(平行于入射面)在反射镜上的反射相位差以及反射镜的反射系数均有关。

关键词: 激光光学; 椭圆偏振态; 法拉第片; 最佳入射角

中图分类号: V241.5⁺58

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.020

Optimum incident angle to Faraday wedge of multi-oscillator ring laser gyroscope

SUO Gaojie, QIU Fusheng, SONG Kai

(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to explore effect of incident light polarization on optimum incident angle to Faraday wedge of multi-oscillator ring laser gyroscope, the Jones matrix for Faraday wedge was established. The circularly polarization and the elliptically polarization were numerically simulated by using MATLAB. The optimum incident angle was obtained by searching for the minimum amplitude of magnetic circular dichroic loss at different incident angles and different temperatures in the range of $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$. The results show the optimum incident angles to Faraday wedge for circularly polarization and elliptically polarization are different. This difference is enough to affect measurement accuracy of multi-oscillator ring laser gyroscope. The impact of incident polarization on the optimum incident angle should be taken into consideration when placing Faraday wedge. Phase shifts of p (perpendicular to incident plane) and s (parallel with incident plane) polarizations, reflecting coefficients of four reflecting mirrors of multi-oscillator ring laser gyroscope have the influence on the optimum incident angle.

Key words: laser optics; elliptically polarization; Faraday wedge; optimum incident angle

引言

激光陀螺仪作为角速度传感器广泛应用于航空、航海等领域^[1]。虽然激光陀螺在角速度测量方面有卓越优势,但是在低频区出现的闭锁效应大大影响了其可靠性^[2]。四频差动激光陀螺利用光学恒定偏频解决了闭锁效应^[3],从而提高了陀螺仪的性能。

恒定偏频由互易性偏频和非互易性偏频组成,其中非互易性偏频利用法拉第室磁旋光效应^[4]实现。法拉第室内有劈尖形状的法拉第片,光线穿过法拉第片时,直接穿过法拉第片的折射光束、折射-散射-反射光束与折射-反射-散射光束发生三光束干涉。温度变

化时^[5],法拉第片的几何参量随之发生变化,从而造成测量误差,研究发现,与温度变化导致的误差相关的有3种损耗,分别是偏振差分损耗(differential directional loss, DPL)、方向差分损耗(differential directional loss, DDL)和磁圆二向色性差分损耗(magnetic circular dichroic loss, MCDL),其中MCDL对四频差动激光陀螺的影响是另外两种损耗的千倍量级,所以希望优化法拉第片参量来减小MCDL^[6]。

考虑到光波的传播方向和旋向,回路中有4种传播模式,由于四频差动激光陀螺光路中入射光线与构成回路的反射镜不垂直,导致4种模式在传输过程中产生微小极化偏差^[7],变为椭圆偏振态而非理想的圆偏振态。但现有文献中大都忽略极化偏差,而用圆偏振态讨论。

为了能够更真实体现极化偏差对实际系统的影响,本文中从椭圆偏振态^[8]出发,建立四频差动激光

作者简介: 锁高洁(1990-),女,硕士研究生,现主要从事四频差动激光陀螺中法拉第片的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fsqiu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-01-31

陀螺的琼斯矩阵^[9],并计算出法拉第片的最佳入射角。首先是建立了四频差动激光陀螺的结构及琼斯矩阵,然后分别讨论不同偏振态下法拉第片的最佳入射角,另外还讨论了反射镜引起的反射相位差对最佳入射角的影响。

1 基本原理及光路

1.1 四频差动激光陀螺几何光路图

如图1所示,4个非共面的反射镜(M_1, M_2, M_3, M_4)构成异面腔^[6,10]产生了互易偏频^[3],其中 M_1, M_2, M_3 3个反射镜表面理想光滑,光线在这3个面上发生全反射^[7,11],输出面 M_4 的反射系数低于另外3个反射镜,光线由 M_4 射出回路。

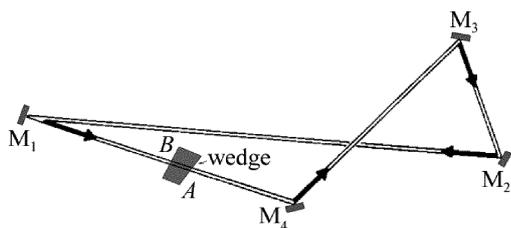


Fig. 1 Geometry of the optical paths of a multis oscillator ring laser gyroscope

闭合回路中有顺时针方向(clockwise, CW)和逆时针方向(anticlockwise, ACW)两束光,顺时针光路的传播路径为 $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_1$,逆时针光路的传播路径为 $M_1 \rightarrow M_4 \rightarrow M_3 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1$ 。由于每束光分左旋和右旋,四频差动激光陀螺仪的回路中的4种模式光为:顺时针左旋光束、顺时针右旋光束、逆时针左旋光束、逆时针右旋光束。

在 $M_1 \rightarrow M_4$ 光路中加入法拉第室^[6]产生了非互易偏频^[12],法拉第室内的光楔称为法拉第片,光线在法拉第片上发生三光束干涉,这三束光分别是主光线和主光线在法拉第片内表面反射、散射而产生的另外两束光。

1.2 法拉第片三光束干涉

图2中,两束光相向而行穿过法拉第片,A点传播到B点的光路为顺时针光路(CW),B点传播到A点的光路为逆时针光路(ACW),它们与陀螺回路中的逆

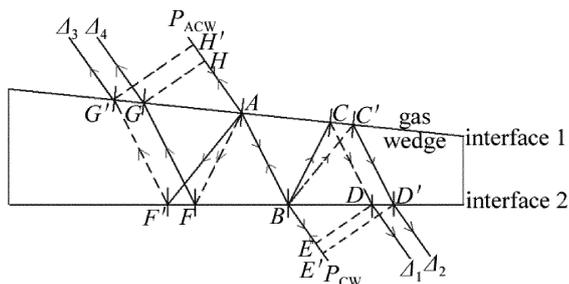


Fig. 2 The beam paths of the three-beam interference in the Faraday optical wedge

时针及顺时针光路相对应。

顺时针光路中,激光由H点传播到A点,并在法拉第片上表面发生折射进入劈尖,由于法拉第片上下表面的透射系数很大,折射光的大部分从下表面B点折射到空气中,该光线称为主光线 P_{CW} ,折射光的剩余部分在玻璃内经过多次反射和散射从法拉第片的下表面射出,由于多次散射和反射光线非常弱,本文中只考虑一次散射和反射。把从法拉第片下表面B点反射到上表面C点、再从C点散射到下表面D点并出射到空气中的光线称为光线1(Δ_1);从下表面B点散射到上表面C'点、并在C'点发生反射而传播到下表面D'点的光线称为光线2(Δ_2)。主光线 P_{CW} 、光线1及光线2平行,发生三光束干涉^[13]。

同时,逆时针光路也存在这样的三束光,分别是:从下表面B点入射到劈尖,再由上表面A点折射出玻璃的主光线 P_{ACW} ;在A点反射、F点散射的反射-散射光线;在A点散射、G点反射的散射-反射光线。逆时针光路的反射-散射光线为光线3(Δ_3),散射-反射光线为光线4(Δ_4),主光线 P_{ACW} 与这两条光线也发生三光束干涉。

1.3 四频差动激光陀螺的琼斯矩阵

顺时针方向,四频差动激光陀螺的琼斯矩阵^[14]表示为:

$$M_{CW} = I_{41} A^{-1} F_{CW} A R_{M_4} I_{34} R_{M_3} I_{23} R_{M_2} I_{12} R_{M_1} \quad (1)$$

式中, I_{ab} ($a, b = 1, 2, 3, 4$)表示光线从反射镜 M_a 到反射镜 M_b 的像转矩阵, A 和 A^{-1} 分别表示线偏振光到圆偏振光、圆偏振光到线偏振光的转换矩阵, F_{CW} 表示顺时针光线在法拉第片内的传输矩阵, R_{M_c} ($c = 1, 2, 3, 4$)是镜子 M_c 的反射矩阵。

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} \cos \rho_{ab} & \sin \rho_{ab} \\ -\sin \rho_{ab} & \cos \rho_{ab} \end{bmatrix},$$

$$(a = 1, 2, 3, 4; b = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中, ρ_{ab} 是光束从镜子 M_a 反射到 M_b 的像转角。

顺时针方向,光线穿过法拉第片会发生三光束干涉,这三束光的琼斯矩阵分别是:

$$F_{\Delta_1} = e^{i\delta_1} F_{12} S_F F_{21} R_F F_{12} \quad (3)$$

$$F_{\Delta_2} = e^{i\delta_2} F_{12} R_F F_{21} S_F F_{12} \quad (4)$$

$$F_{P_{CW}} = \gamma_{CW} \cdot F_{12} \quad (5)$$

式中, F_j ($i, j = 1, 2$)是光线在法拉第片表面 i 传播到表面 j 的旋转矩阵, δ_1 和 δ_2 分别是光线1和光线2的相位, S_F 和 R_F 是法拉第片的散射矩阵和反射矩阵, γ_{CW} 是主光束 P_{CW} 的损耗。

因此,顺时针传播时法拉第片的琼斯矩阵为^[15]:

$$F_{CW} = F_{\Delta_1} + F_{\Delta_2} + F_{P_{CW}} \quad (6)$$

$$R_{M_c} = \begin{bmatrix} r_{p_c} \exp(i\delta_{ps}) & 0 \\ 0 & -r_{s_c} \end{bmatrix}, (c = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

光波在镜面 M_c 上发生反射时, r_{p_c} 表示光波 p 分量的反射系数, r_{s_c} 是光波 s 分量的反射系数, δ_{ps} 是光波 p 分量和 s 分量的相移。

由于光波分左旋和右旋, 顺时针光路的琼斯矩阵 M_{CW} 有 2 个本征矢:

$$E_{l,CW} = \begin{bmatrix} P_{l,CW} \\ S_{l,CW} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$E_{r,CW} = \begin{bmatrix} P_{r,CW} \\ S_{r,CW} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $E_{l,CW}$ 表示顺时针左旋椭圆偏振光的本征矢, 它的本征值是 $\lambda_{l,CW}$, 顺时针右旋椭圆偏振光的本征矢 $E_{r,CW}$ 的本征值为 $\lambda_{r,CW}$ 。

同理, 逆时针光路的琼斯矩阵为:

$$M_{ACW} = I_{14} \cdot R_{M_1} \cdot I_{21} \cdot R_{M_2} \cdot I_{32} \cdot R_{M_3} \cdot I_{43} \cdot R_{M_4} \cdot A^{-1} \cdot F_{ACW} \cdot A \quad (10)$$

$$F_{ACW} = F_{\Delta_3} + F_{\Delta_4} + F_{P_{ACW}} \quad (11)$$

式中, F_{ACW} 是逆时针光波穿过法拉第片的琼斯矩阵, $F_{\Delta_3}, F_{\Delta_4}, F_{P_{ACW}}$ 分别是光束 3、光束 4 和主光束 P_{ACW} 的琼斯矩阵。

逆时针方向左旋椭圆偏振光本征矢 $E_{l,ACW}$ 的本征值用 $\lambda_{l,ACW}$ 表示, 逆时针方向右旋椭圆偏振光的本征矢 $E_{r,ACW}$ 的本征值是 $\lambda_{r,ACW}$ 。

$$E_{l,ACW} = \begin{bmatrix} P_{l,ACW} \\ S_{l,ACW} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$E_{r,ACW} = \begin{bmatrix} P_{r,ACW} \\ S_{r,ACW} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由上可以看出, 在激光陀螺仪中, 有 4 种偏振模式的椭圆偏振光, 分别是顺时针左旋椭圆偏振光、顺时针右旋椭圆偏振光、逆时针左旋椭圆偏振光和逆时针右旋椭圆偏振光。当这 4 种模式的光在激光陀螺仪中传输时, 有 3 种损耗随温度变化比较明显, 分别是 DPL, DDL 和 MCDL^[6], 它们与法拉第片的三光束干涉有关, 这 3 种损耗中 MCDL 对温度最敏感, 为了提高激光陀螺的性能, 必须减小 MCDL。

$$\gamma_{DPL} = \frac{(\gamma_{r,ACW} - \gamma_{l,CW}) + (\gamma_{r,CW} - \gamma_{l,ACW})}{4} \quad (14)$$

$$\gamma_{DDL} = \frac{(\gamma_{l,ACW} - \gamma_{r,CW}) + (\gamma_{r,ACW} - \gamma_{l,CW})}{4} \quad (15)$$

$$\gamma_{MCDL} = \frac{(\gamma_{l,CW} - \gamma_{r,CW}) + (\gamma_{r,ACW} - \gamma_{l,ACW})}{4} \quad (16)$$

式中, $\gamma_{l,CW}, \gamma_{r,CW}$ 为顺时针左旋光和右旋光的损耗,

$\gamma_{l,ACW}, \gamma_{r,ACW}$ 为逆时针左旋光和右旋光的损耗。

2 模拟结果

为了寻找法拉第片的最佳入射角 i , 用 MATLAB 建立激光陀螺的琼斯矩阵, 首先, 模拟的是理想情况下的圆偏振光, 图 3 的横坐标表示温度变化 (-40°C 到 80°C), 纵坐标表示 MCDL, 最大振幅用 A_m 表示, 任意给定从空气到法拉第片的入射角, 图中可以看出, MCDL 以零点为中心随温度的变化发生周期性变化, 且 $A_m = 1.22 \times 10^{-9}$ 。

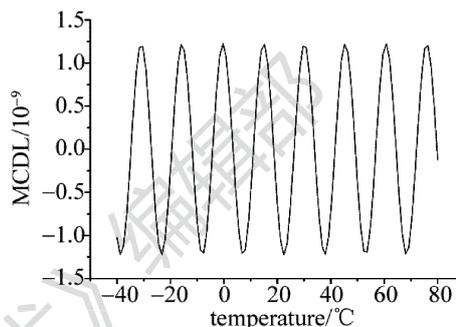


Fig. 3 MCDL changing with temperature polarization ($i = 7^\circ$)

根据实际工艺要求, 本文中法拉第片的参量如表 1 所示。

Table 1 The parameters of Faraday

| | |
|---|--------------|
| refractive index of the optical wedge at 20°C | 1.45700 |
| thickness of the optical wedge at 20°C | 2mm |
| the wedge angle of the optical wedge | 3min |
| the phase shift from the Faraday effect in the wedge for one path | 0.09° |

改变法拉第片入射角, 当 $i = 7.8512^\circ$ 时, A_m 出现最小值 3.23×10^{-13} , 此时的入射角为最佳入射角, 对比图 3 和图 4 发现: (1) 最佳入射角时, MCDL 不再随温度变化发生周期性变化, 并且在 30° 附近出现最小值, 而图 3 中的振幅几乎相等; (2) 图 4 中的 A_m 远远小于图 3, 说明入射角大小对 MCDL 的大小和周期影响非常大。

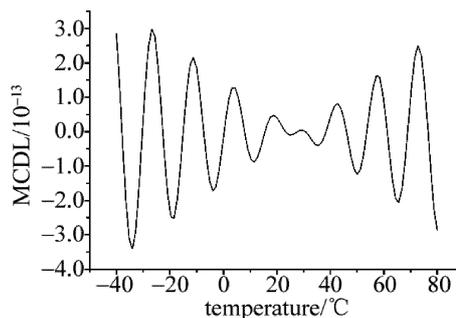


Fig. 4 MCDL changing with temperature polarization ($i = 7.8512^\circ$)

但是在实际情况下, 光波在异面腔内传播时, 4 个反射面的反射系数不同, 因此反射光的 p 分量和 s 分

量存在反射相位差,激光陀螺的本征模不再是圆偏振态,而是椭圆偏振态。利用表1和表2中的参量模拟椭圆偏振态的情况,当入射角为 7.8512° 时,MCDL随温度的变化曲线由图5给出。

Table 2 The parameters of the four reflecting surfaces

| reflecting coefficient of p polarization | | | |
|--|--------|--------|--------|
| M_1 | M_2 | M_3 | M_4 |
| 0.9995 | 0.9995 | 0.9995 | 0.9950 |
| reflecting coefficient of s polarization | | | |
| M_1 | M_2 | M_3 | M_4 |
| 0.9999 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9990 |

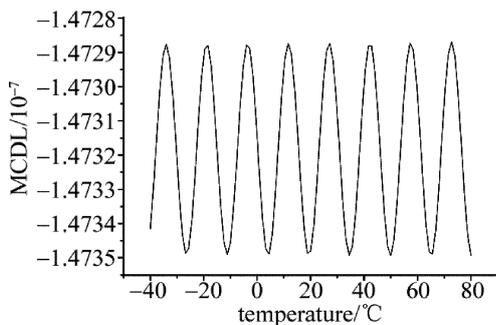


Fig. 5 MCDL changing with temperature in the elliptically polarization ($i = 7.8512^\circ$)

图5中, $A_m = 3.12 \times 10^{-11}$,MCDL随温度的变化发生周期性变化,但一直是负值,说明椭圆偏振态下的MCDL有本底,并且MCDL没有出现最小值区域,说明圆偏振态下的最佳入射角不再是椭圆偏振态的最佳入射角。

利用搜索法得到椭圆偏振态下法拉第片的最佳入射角为 7.8304° ,MCDL有最小值区域且 $A_m = 3.19 \times 10^{-13}$,远小于图5中的 A_m ,对比图6和图4发现,它们的温变曲线相似,但是最佳入射角发生了偏移。

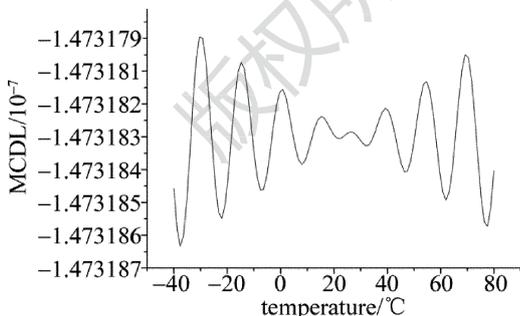


Fig. 6 MCDL changing with temperature in the elliptically polarization ($i = 7.8304^\circ$)

利用表1中所示参量计算容差后发现,法拉第片的最佳入射角安装容差与光的偏振态无关,若要容差目标的 $A_m = 2 \times 10^{-11}$,最佳入射角的安装容差为 0.026° ,而圆偏振光下的最佳入射角与椭圆偏振光下的最佳入射角相差 0.021° ,因此在实际安装中需要把椭圆偏振态考虑进去。反射面引起的反射相位差有正

负之分^[16] (“+”表示正相移,“-”表示负相移),经计算发现,相移大小和正负组合不同时,最佳入射角也会发生变化。

图7沿用表1、表2中的参量,横坐标表示相移大小,纵坐标表示法拉第片的最佳入射角,中间分别表示的是3种不同相移组合和理想圆偏振态下最佳入射角的变化趋势,可以看出,相移的绝对值越大,最佳入射角的偏差越大,相移“+ - + -”组合更接近理想情况。

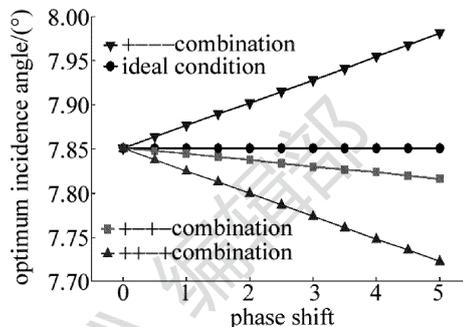


Fig. 7 The optimum incident angles changing with the phase shifts

最佳入射角与镜子 M_4 的反射系数也有关,改变表2中 M_4 的反射系数,不同相移组合的最佳入射角由图8给出。

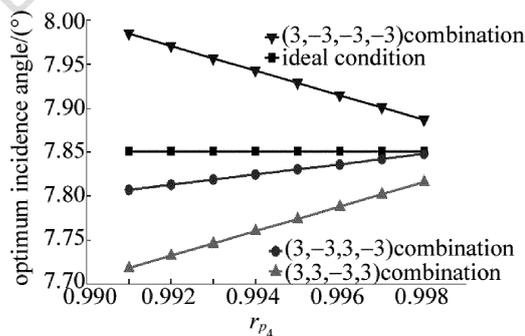


Fig. 8 The optimum incident angles changing with r_{p4}

图8中,当 M_4 的反射系数从0.990变化到0.999时,不同相移组合所计算的最佳入射角逐渐接近理想情况,并且(3,-3,3,-3)组合最符合理想情况,在实际操作中,应该尽可能地提高 M_4 的反射率。

3 结论

总结计算了椭圆偏振态和圆偏振态下四频差动激光陀螺仪法拉第片最佳入射角,并比较了不同反射镜参量下,椭圆偏振态与理想情况的最佳入射角变化。

(1) 无论入射光是圆偏振光还是椭圆偏振光,法拉第片最佳入射角时,MCDL都存在最小值区域。

(2) 入射光偏振态不同时,法拉第片的最佳入射角有所不同。

(3) 椭圆偏振态时,反射镜相移的正负组合对法

拉第片的最佳入射角也有一定影响,其中“+ - + -”组合更接近圆偏振态的理想情况。

(4)4个反射镜的偏振情况以及输出镜的反射系数均与法拉第片的最佳入射角有关,减小所有反射镜的相移或增大输出镜的反射系数,均可使激光陀螺仪更符合理想情况。

参 考 文 献

- [1] WANG Z G, LONG X W, WANG F. Overview of four-mode differential laser gyros [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040005 (in Chinese).
- [2] WANG Z G, LONG X W, WANG F. Influence of differential loss on zero drift in four-frequency differential laser gyros [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 823-827 (in Chinese).
- [3] JIANG Y J. Study on the basic characteristics of the faraday bias in differential laser gyro[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006: 16-30 (in Chinese).
- [4] HUANG H, BO S L. Research on faraday effect in magneto-optic glass [J]. *Applied Optics*, 2004, 25(4): 14-17.
- [5] ZHOU L, REN L, LIU Q Q, *et al.* The compensation method for thermal bias of ring laser gyro[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(3): 353-356 (in Chinese).
- [6] MARTIN G J. Multioscillator ring laser gyro using compensated optical wedge: US, 5907402[P]. 1999-05-25.
- [7] REN S F. Polarization states of linearly polarized light transmitting through several wave-plates with arbitrary thickness [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 394-397 (in Chinese).
- [8] XIONG X M, WANG M, QIN Z J. A method of temperature compensation for all optical fiber current sensors[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 759-763.
- [9] FENG T, JIAO Z Y, ZHOU Q, *et al.* Analysis of optical axis variations in monolithic nonplanar ring laser [J]. *Chinese Optical Letters*, 2014, 12(1): 011402.
- [10] WANG Z G. Bias characteristics of four-mode differential laser gyroscope with nonplanar cavity and its electronic system design [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010: 19-22 (in Chinese).
- [11] CHOW W, GEA-BANACLOCHE J, PEDROTTI L, *et al.* The ring laser gyro [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1989, 57(1): 61-104.
- [12] MARTIN G J. Non-planar gyros and magnetic biases [J]. *Proceedings of the SPIE*, 1984, 487: 94-101.
- [13] YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 306-313 (in Chinese).
- [14] PAN H J, LIU Y. Matrix method to express the reflecting process of beam [J]. *Applied Optics*, 2004, 25(4): 9-13.
- [15] AI Y B, JIN Y J. Faraday magneto-optical rotation effect and its application [J]. *Physics and Engineering*, 2002, 12(5): 50-51.
- [16] ZHAO J L. *Advanced optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 36-42 (in Chinese).