

轻微非共面腔的磁效应特性研究

许光明 王 飞 宋建文

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 激光陀螺应用过程中磁效应引起零偏的变化对陀螺精度会产生重要影响。对于激光陀螺的磁效应,建立了理论模型,分析了产生磁效应的诸多因素。分析结果表明,谐振腔光路的轻微非共面是激光陀螺磁敏感产生的主要原因,可以通过调整一个腔平移镜的轴线方向来减小光路的非共面角,进而达到减小激光陀螺磁灵敏度的目的,并通过实验验证了上述结论。

关键词 激光技术;激光陀螺;磁灵敏度;零偏;轻微非共面腔;非共面角

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0514003

Research of Magnetic Effect in Little Non-Planar Resonators

Xu Guangming Wang Fei Song Jianwen

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Magnetic effects in the laser gyro application process can cause a change of the bias stability of gyro, which will have a major impact on gyro accuracy. The theoretical model about the magnetic effect of the laser gyro is established to analyze factors which generate the magnetic effect. Analyzing result shows that the little non-coplanar optical path in the laser gyro magnetic effects is the main reason of magnetic sensitivity. Magnetic effects of laser gyro can be decreased by adjusting the axial direction of a cavity pan mirror to reduce the optical path of non-coplanar angle. The above conclusions are proved by the experiment.

Key words laser technique; laser gyro; magnetic sensitivity; bias; little non-planar resonators; non-planar angle

OCIS codes 140.3370; 140.3410; 140.4780

1 引 言

在激光陀螺(RLG)的应用过程中,影响陀螺精度的因素很多,其中磁场引起的零偏变化是影响激光陀螺准确度的重要因素之一^[1],通常用磁灵敏度来描述外界磁场对激光陀螺零偏的影响^[2]。对于方形机械抖动激光陀螺而言,一般要求磁灵敏度优于其零偏重复性一个数量级左右,具体由应用单位自行约定。

理想的激光陀螺(以方形谐振腔环形激光器为例)的谐振腔的四条边是共面的。但是由于陀螺腔体的光学加工误差和准直误差(调腔误差)的存在,不可避免地存在激光光路的空间非共面问题。光路的非共面会引起陀螺零偏对磁场的敏感^[3,4]。引起

激光陀螺磁敏感的因素很多,实验证明激光陀螺光路的非共面是引起激光陀螺磁敏感的主要原因。

本文从理论上分析了影响激光陀螺磁灵敏度的主要因素,对激光光路轻微非共面引起的激光陀螺磁敏感效应进行了实验验证,在此基础上通过对激光陀螺腔平移镜的外部修正,减小陀螺激光光路的非共面性,从而达到减小激光陀螺磁灵敏度的目的。

2 谐振腔非共面角与激光陀螺磁灵敏度的关系

2.1 谐振腔非共面角 ϵ 与图像旋转角 A_r

理想的方形谐振腔如图 1 所示。镜片 M_2 和 M_3 是球面片, M_1 和 M_4 是平面片, L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4

收稿日期: 2012-12-06; 收到修改稿日期: 2013-01-16

作者简介: 许光明(1967—),男,硕士,副教授,主要从事环形激光器方面的研究。E-mail: guangmxu@sina.com

分别是四条边,CCW 表示逆时针方向,CW 表示顺时针方向。

首先对于方形谐振腔而言,由于存在贴片面的光学加工误差、准直误差(调腔误差)和谐振腔球面镜的横向角度误差(或称为镜片的歪扭)等,谐振腔的环形闭合光路会产生轻微非共面,形成非共面角 ϵ 和轻微非共面腔^[5],如图 2(a)所示,虚线部分为方形平面腔,实线部分为轻微非共面腔。

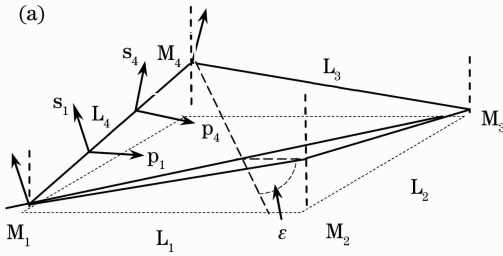


图 2 轻微非共面腔的图像旋转角 A_r

Fig. 2 Image rotation angle A_r of little non-planar resonators

对于每一个反射镜而言,入射光路和反射光路所确定的平面决定了反射光的 s 和 p 偏振方向。由于闭环光路存在轻微的非共面,光线经过一个反射镜后,其偏振方向会发生一定的旋转,图 2(a)中给出了在 M_1 、 M_4 两个相邻镜片组成的一条边 L_4 上的两套坐标系,它们分别是 $s_1 p_1$ 和 $s_4 p_4$ 。 s_1 和 s_4 为相应的 s 偏振方向, p_1 和 p_4 为相应的 p 偏振方向。 $s_1 p_1$ 是 L_4 上基于 L_4 和 L_1 两条边所组成的入射面内的坐标系, $s_4 p_4$ 是 L_4 上基于 L_4 和 L_3 两条边所组成的入射面内的坐标系,环形光路轻微非共面角 ϵ 会产生相应的图像旋转角 A_r ,如图 2(b)所示,也就是相邻两套坐标系之间的夹角,即 s_1 和 s_4 之间的夹角,闭环光路依次经过 4 条边,共有 4 次图像旋转效应。非共面角 ϵ 与图像旋转角 A_r 存在如下关系^[6]:

$$\sin A_r = \cos^2(\epsilon/2). \quad (1)$$

2.2 激光陀螺磁灵敏度的数学描述及各参量的分析

激光陀螺谐振腔中 4 个反射片对传输光的偏振态的作用可用二维琼斯矩阵表示。一个多层电介质镜片对传输光束偏振态的影响可以用以下矩阵来表示^[5]:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} R_{si} \exp(ir_i/2) & 0 \\ 0 & -R_{pi} \exp(-ir_i/2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 R_{si} 和 R_{pi} 是各镜片对“s”光和“p”光的反射率, r_i 是镜片的相位延迟。

激光陀螺环形光路非共面导致的图像旋转角

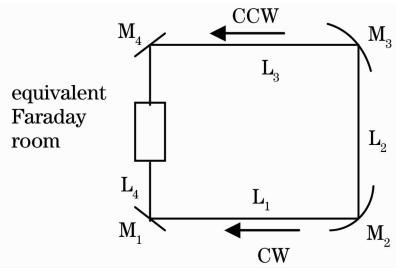
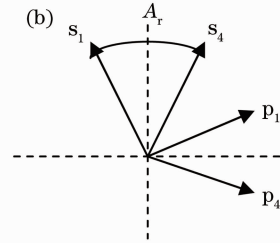


图 1 方形谐振腔激光陀螺

Fig. 1 Square resonant cavity laser gyro



A_r 所产生的效应可以用以下矩阵来表示(下标 c 表示顺时针,cc 表示逆时针,以下同):

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{i,c}(A_r) &= \begin{bmatrix} \cos A_{ri} & \sin A_{ri} \\ -\sin A_{ri} & \cos A_{ri} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_{i,cc}(A_r) &= \begin{bmatrix} \cos A_{ri} & -\sin A_{ri} \\ \sin A_{ri} & \cos A_{ri} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

一般情况下, A_r 只有几个角秒的大小,所以(3)式可以简化为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{i,c}(A_r) &= \begin{bmatrix} 1 & A_{ri} \\ -A_{ri} & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_{i,cc}(A_r) &= \begin{bmatrix} 1 & -A_{ri} \\ A_{ri} & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

外界磁场 \mathbf{B} 产生的效应可以用以下矩阵来表示:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_c &= \begin{bmatrix} \cos F_{ai} & \sin F_{ai} \\ -\sin F_{ai} & \cos F_{ai} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_{cc} &= \begin{bmatrix} \cos F_{ai} & -\sin F_{ai} \\ \sin F_{ai} & \cos F_{ai} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 F_{ai} 为法拉第旋转角, $F_{ai} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ rad/Gs} \times B$ ($1 \text{ Gs} \hat{=} 1 \times 10^{-4} \text{ T}$)。在实际应用中环形激光器增益区外磁场一般只有几个高斯的大小,经过磁屏蔽后就更小,因此(5)式可以进一步简化为

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} 1 & F_{ai} \\ -F_{ai} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{cc} = \begin{bmatrix} 1 & -F_{ai} \\ F_{ai} & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在得出各个参量所对应的琼斯矩阵后,光束在轻微非共面腔中传输一周的琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}_c = \mathbf{B}_{1,c} \mathbf{M}_1 \mathbf{B}_{2,c} \mathbf{M}_2 \mathbf{B}_{3,c} \mathbf{M}_3 \mathbf{B}_{4,c} \mathbf{M}_4 \mathbf{F}_c, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_{cc} = \mathbf{F}_{cc} \mathbf{M}_4 \mathbf{B}_{1_{cc}} \mathbf{M}_3 \mathbf{B}_{3_{cc}} \mathbf{M}_2 \mathbf{B}_{2_{cc}} \mathbf{M}_1 \mathbf{B}_{1_{cc}}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{M}_c 和 \mathbf{M}_{cc} 分别是光束沿顺时针方向和逆时针方向传输所得的琼斯矩阵。可以推导出琼斯矩阵 \mathbf{M}_c 和 \mathbf{M}_{cc} 的特征向量 \mathbf{E} 和特征值 $\lambda^{[5]}$, 即

$$\mathbf{M}\mathbf{E} = \lambda\mathbf{E}. \quad (9)$$

由特征向量可以计算出输出光的椭圆度, 而由特征值 λ 可以计算出磁灵敏度。通过计算顺、逆时针方向的特征值, 轻微非共面腔的磁灵敏度可以用以下公式表示^[3]:

$$\Delta\nu = \frac{\text{Im}(\lambda_c - \lambda_{cc})}{2\pi} \times c/L, \quad (10)$$

式中 λ_c 和 λ_{cc} 分别为顺时针和逆时针方向的琼斯矩阵 \mathbf{M} 的特征值, c 为光速, L 为环形光路的光程。(10)式与 Litton 公司计算的方形谐振腔环形激光器的磁灵敏度公式^[7]

$$\Delta\nu = \left(\frac{4k_1 A_r}{r} \right) \cdot \left(\frac{c}{L} \right) \quad (11)$$

的计算结果在数量级上相同。(11)式中, k_1 是激光增益介质在磁场作用下产生的法拉第旋光效应的旋光角度。

由(10)、(11)式可得出, 影响激光陀螺磁灵敏度的参量为法拉第旋光效应的旋光角度 k_1 、反射镜的相位延迟 r 和图像旋转角 A_r 。法拉第旋光效应的旋光角度 k_1 对陀螺磁灵敏度的贡献为外界磁场对谐振腔增益区的影响, 陀螺调腔完成后只能通过减小外界磁场来实现。反射镜的相位延迟 r 增大时, 磁零偏会减小, 但相位延迟 r 与反射镜的膜系设计有关, 效果也难以控制^[8]。当环形光路的谐振腔非共面导致的图像旋转角 A_r 为零时, 磁零偏为零, 可见图像旋转角对于激光陀螺的磁灵敏度的影响最为直接, 并且可以在陀螺调腔完成后, 通过对非共面角 ϵ 的调整来改变图像旋转角 A_r , 进而实现对陀螺磁灵敏度的干预。

3 轻微非共面腔磁灵敏度的实验测量和抵消方法

3.1 非共面角 ϵ 与腔平移镜轴线变化角度 θ 的关系

在激光陀螺完成调腔后, 反射镜的相位延迟 r 在陀螺应用过程中可以认为是不变的, 法拉第旋光效应的旋光角度 k_1 在外界磁场一定时也可以认为是不变的, 要减小激光陀螺磁敏感只有从非共面角 ϵ 入手^[9]。激光陀螺在工作过程中为了保持腔长稳定, 需要一个腔长控制机构。将球面片 M_2 、 M_3 作成槽片形式, 并装上驱动装置, 组成腔平移镜结构^[10]。由于腔平移镜驱动装置需要对槽片的中心柱预顶入几个模的距离, 因此可以选择不同的腔平移镜驱动螺钉, 利用其球头触点的误差人为改变一个腔平移镜的预顶方向, 从而改变非共面角 ϵ , 达到减小激光陀螺的磁灵敏度的目的。腔平移镜轴线变化的角度 θ 与非共面角 ϵ 的关系也基本满足^[6]

$$\sin \theta = \cos^2(\epsilon/2). \quad (12)$$

3.2 非共面角 ϵ 的确定与调整

3.2.1 非共面角 ϵ 的确定

非共面角 ϵ 的测量是困难的。但本实验只是要找到减小激光陀螺磁敏感的方法, 因此不必对非共面角 ϵ 进行精确的测量, 只需要通过改变腔平移镜轴线变化的角度 θ (腔平移镜的预顶方向) 来改变非共面角 ϵ , 进而找到陀螺磁最不敏感位置即可。

为了达到调整 ϵ 的目的, 首先要找到能代表 ϵ 角度值的可观测参数。利用图 3 的装置可以对陀螺输出管口和光栏处的激光光斑位置进行精确的定位^[10]。这两处光斑的位置可以认为代表了陀螺谐振腔中的激光光路, 因此也就代表了谐振腔光路的非共面角 ϵ 。调整腔平移镜时可根据陀螺输出管口和光栏处的激光光斑位置的变化初步判断预顶的方向和大小, 最终找到减小 ϵ 的腔平移镜预顶的方向和大小。

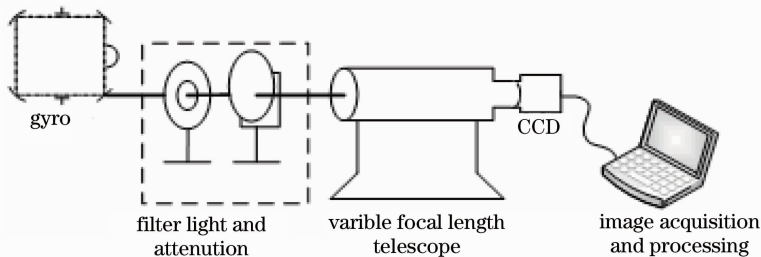


图 3 激光光斑定位系统

Fig. 3 Laser spot positioning system

3.2.2 非共面角 ϵ 的调整

样本陀螺有两个腔平移镜(球面镜),如果两个腔平移镜预顶方向同时调整,则相当于谐振腔闭环光路的上移或下移,闭环光路的非共面角 ϵ 变化很小,因此,只需改变一个腔平移镜如 M_2 的预顶方向即可实现对非共面角 ϵ 的调整。

3.3 激光陀螺零偏与磁场的敏感关系

3.3.1 激光陀螺磁敏感的测量

实验陀螺均为某型机械抖动激光陀螺,约定当其磁灵敏度优于 $5 \times 10^{-4} / (\text{h} \cdot \text{Gs})$ 时就能满足该型激光陀螺的应用要求^[11]。需要说明的是,本文中激光陀螺的磁灵敏度是指将陀螺置于带磁屏蔽的安装盒中,磁屏蔽效率为 20 倍左右时测得的磁灵敏度。

表 1 激光陀螺磁灵敏度测量数据 1

Table 1 Laser gyro magnetic sensitive measurement data 1

Gyro state	X direction			Y direction			Z direction		
	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG
Bias / (Hz/s) (0 Gs)	-3.7848	-3.8023	-3.7863	6.7341	6.7006	6.6350	6.7039	6.7557	6.6742
Bias / (Hz/s) (20 Gs)	-3.7827	-3.8012	-3.7843	6.7632	6.7520	6.6403	6.7195	6.7699	6.6769
Magnetic sensitivity [$(^\circ)/(\text{h} \cdot \text{Gs})$]	1.9530×10^{-4}	1.023×10^{-4}	1.8600×10^{-4}	2.7063×10^{-3}	4.7802×10^{-3}	4.9290×10^{-4}	1.4508×10^{-4}	1.3206×10^{-3}	2.5110×10^{-4}

表 1 表明,三个样本都存在一定的磁敏感,3[#] 陀螺磁灵敏度优于 $5 \times 10^{-4} / (\text{h} \cdot \text{Gs})$,可以不需要调整,下面以 1[#]、2[#] 陀螺为例来分析激光陀螺光路非共面角 ϵ 与磁场的敏感关系以及抵消方法。

3.3.2 激光陀螺磁敏感的抵消方法

为了寻找激光陀螺零偏与磁场的敏感关系,首

表 2 激光陀螺磁灵敏度测量数据 2

Table 2 Laser gyro magnetic sensitive measurement data 2

Gyro state	X direction			Y direction			Z direction		
	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG
Bias / (Hz/s) (0 Gs)	-3.7913	-3.8039	-3.7863	6.7232	6.7010	6.6350	6.6503	6.7031	6.6742
Bias / (Hz/s) (20 Gs)	-3.7883	-3.8027	-3.7843	6.7715	6.7092	6.6403	6.6533	6.7083	6.6769
Magnetic sensitivity /[$(^\circ)/(\text{h} \cdot \text{Gs})$]	2.7900×10^{-4}	1.1160×10^{-4}	1.8600×10^{-4}	4.4919×10^{-3}	7.6260×10^{-4}	4.9290×10^{-4}	2.2650×10^{-4}	4.8360×10^{-4}	2.5110×10^{-4}

由于 1[#] 陀螺灵敏度感朝大的方向变化,反向调整腔平移镜 M_2 的预顶位置,2[#] 陀螺磁灵敏度有所改善,继续沿同样方向调整腔平移镜 M_2 的预顶位置,重新测量。经过对三个激光陀螺的腔平移镜 M_2 预顶方向的精心调整,均可将它们的磁灵敏度降低到很低的水平,数据如表 3 所示。

将激光陀螺置于均匀磁场中,测量陀螺零偏在加入磁场前后的变化值,由此求出陀螺的磁灵敏度。均匀磁场由亥姆霍兹线圈产生,实验所用亥姆霍兹线圈是由一对半径均为 350 mm、同轴放置、且间距为 300 mm 的圆线圈构成的。

按照激光陀螺的敏感面垂直方向(Z 方向),陀螺敏感面内的沿增益区方向(Y 方向)和垂直增益区方向(X 方向)分别加入 20 Gs 的均匀磁场,测量磁场加入前后的零偏变化。理论上激光陀螺磁敏感方向是沿增益区方向,即 Y 方向,由于陀螺结构存在一定的非对称性以及磁场分布等原因,在 X 和 Z 方向上也有一定的磁敏感^[12,13]。激光陀螺原始状态下的测量数据如表 1 所示。

先按图 3 的方法确定陀螺的光路,即确定非共面角 ϵ ,测量在此光路下陀螺零偏对磁场的敏感度。然后通过调节腔平移镜 M_2 的预顶方向来轻微改变陀螺的光路,再次测量陀螺磁灵敏度。如此重复测量,直到找到陀螺最不敏感的位置为止。适当调整腔平移镜 M_2 的预顶位置,重新测量,数据如表 2 所示。

由表 3 数据可以看出,通过调整激光陀螺的腔平移镜 M_2 预顶方向,可以使它们的磁灵敏度都做到优于 $5 \times 10^{-4} / (\text{h} \cdot \text{Gs})$,基本满足该型激光陀螺的应用需要。

表3 激光陀螺磁灵敏度测量数据3

Table 3 Laser gyro magnetic sensitive measurement data 3

Gyro state	X direction			Y direction			Z direction		
	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG	1 [#] RLG	2 [#] RLG	3 [#] RLG
Bias / (Hz/s) (0 Gs)	-3.7846	-3.8032	-3.7863	6.7356	6.7021	6.6350	6.6586	6.7022	6.6742
Bias / (Hz/s) (20 Gs)	-3.7831	-3.8021	-3.7843	6.7331	6.7073	6.6403	6.6605	6.7051	6.6769
Magnetic sensitivity /[$^{\circ}$]/(h·Gs)]	1.3950×10^{-4}	1.0230×10^{-4}	1.8600×10^{-4}	2.3250×10^{-4}	4.8360×10^{-4}	4.9290×10^{-4}	1.7670×10^{-4}	2.6970×10^{-4}	2.5110×10^{-4}

3.3.3 激光陀螺灵敏度的抵消方法的局限性

上述实验说明:通过调节腔平移镜 M_2 的预顶方向来轻微改变陀螺的光路,进而改变光路非共面角 ϵ ,减小陀螺磁敏感的方法是可行的,然而改变光路会引起光线通过光栏的位置发生变化,从而会对陀螺的激光光强和性能产生一定的影响^[14]。只有在陀螺的磁敏感不大,调节腔平移镜预顶方向的光路变化较小时,对陀螺的影响可以忽略,这种方法才是可行的。

4 结 论

激光陀螺的磁效应特性是影响其精度的主要因素之一,而谐振腔的轻微非共面则是陀螺产生磁效应的主要原因。通过对激光陀螺磁灵敏度的理论分析和实验测试,找到了减小激光陀螺磁灵敏度的方法,即通过调整激光陀螺一个腔平移镜的预顶方向,来减小非共面角 ϵ ,进而达到减小陀螺磁灵敏度的目的,实验证明这种减小激光陀螺磁灵敏度的方法是切实可行的。

参 考 文 献

- Gao Bolong, Li Shutang. The Ring Laser Gyro[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1984. 52~54
高伯龙,李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,1984. 52~54
- Chen Linfeng, Han Zonghu. Study on characteristic of ring laser gyroscope sensitive to magnetic fields[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 974~976
陈林峰,韩宗虎. 环形激光器磁灵敏度特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 974~976
- Graham J. Martin. Non-planar gyros and magnetic biases[C]. *SPIE*, 1984, **487**: 94~100
- Laurence G. Cote. A System for Reducing the Sensitivity of a Ring Laser Gyro to Changes in a Magnetic Field[P]. United States Patent, 4698823, [1987-07-03]

- Yang Haodong. The Theoretical Research and Simulation of the Magnetic Effect in Little Non-Planar Resonators[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 4~7
杨昊东. 轻微非共面腔的磁效应理论研究与仿真[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010. 4~7
- David A. Smith. Distorted-induced magnetic field bias in the square ring laser[C]. *SPIE*, 1983, **412**: 229~233
- Robert H. Moore, Denise Durance. Method and Apparatus for Planar Alignment of a Ring Laser Gyroscope for Minimum Magnetic Bias Sensitivity[P]. United States Patent, 4850708, [1989-07-25]
- Mark S. Grasso, Joseph P. Ficalora. Ring Laser Gyroscope Having Reduced Sensitivity to Magnetic Effects [P]. United States Patent, 5104224, [1992-04-14]
- Xu Guangming, Wang Fei. Analysis of ring laser gyro light path variations and its influence to gyro performance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(5): 805~809
许光明,王飞. 激光陀螺光路变动分析及其对陀螺性能的影响[J]. *应用光学*, 2010, **31**(5): 805~809
- Jin Shilong, Long Xingwu, Li Xiaohong *et al.*. Research on new type control mirror of light path and optical path length for ring laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 562~566
金世龙,龙兴武,李晓红等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 562~566
- Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Magtic sensitivity and optimal operating point of four-frequency differential laser gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 481~484
汪之国,龙兴武,王飞等. 四频差动激光陀螺的磁敏感性与最佳工作点[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 481~484
- Gao Bolong, Jiang Ya'nan. Langmuir flow effects in laser gyro drift [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1980, **31**(3): 30~50
高伯龙,姜亚南. 朗缪尔流动的零漂效应[J]. *国防科学技术大学学报*, 1980, **31**(3): 30~50
- Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Research on langmuir flow patterns in laser gyros[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502015
汪之国,龙兴武,王飞. 激光陀螺中朗缪尔流形的研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502015
- Chen Meixiong, Yuan Jie, Long Xingwu. Backscattering coupling effect in square ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100522
陈梅雄,袁杰,龙兴武. 方形谐振腔背向散射耦合效应的初步研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100522