

文章编号: 0253-2239(2010)06-1709-06

四频差动激光陀螺开机零漂特性研究

杨建强¹ 罗云² 廖丹¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073; ² 海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘要 四频差动激光陀螺开机零漂性能对于快速启动场合有重要价值。从开机预热过程出发,分析其物理作用机制,讨论了几种影响因素,并提出相应解决方法。如采用色散平衡技术减小零漂对稳频位置的敏感性,采用自动增益控制回路稳定光强,采用空间异面腔结构消除水晶片负性影响,采用合理的热布局设计加快热平衡过程,采用可靠性高的检测电路增强稳定性,采用相关措施削弱腔体变形等方法。实验表明,这些方法对改善开机零漂性能是有效的,对研究者有一定参考价值。

关键词 激光光学;四频差动激光陀螺;开机零漂;温度特性

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1709

Study on the Startup Null Drift Characteristic of Four-Frequency Differential Laser Gyro

Yang Jianqiang¹ Luo Yun² Liao Dan¹

¹ College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Weaponry Department of Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract The research on startup null drift performance of four-frequency differential laser gyro is very valuable to the fast startup situation. Based on the process of warming-up, physical mechanism were analyzed, some affecting factors of null drift were discussed, and then the corresponding solutions were introduced. For example, we adopt dispersion equalization technology to decrease the sensitivity of gyro drift to frequency stabilizing position, auto-gain control loop to stabilize the light intensity, space non-planar cavity structure to eliminate the effect of quartz crystal, suitable design of thermal arrangement to speed up the heat balance process, reliable detecting circuits to enhance the stability, related measures to minimize the cavity distortion and so on. Experimental results show that these solutions are effective to improve the startup null drift performance of laser gyro, which are helpful to researchers.

Key words laser optics; four-frequency differential laser gyro; startup null drift; temperature characteristic

1 引 言

四频差动激光陀螺是一种真正意义上的全固态激光陀螺,广泛应用于惯性导航领域^[1,2]。四频陀螺从原理上比二频机抖陀螺性能更加优越,由于其结构和工艺特点,提高精度需要克服很多误差因素^[3~6]。其中温度特性一直是制约精度提高的重要因素,很多文献已有详细研究^[7~11]。而陀螺开机初

始几小时预热时的零漂特性,作用机理复杂,以往文献很少涉及,这一过程称为开机零漂^[10]。在快速启动场合,开机零漂性能决定了系统的快速响应能力和抗恶劣环境能力^[9],对于地对空导弹、战斗机等有重要价值。

本文从四频差动陀螺开机预热物理过程出发,分析了影响开机零漂的几种因素,并通过实验研究

收稿日期: 2009-09-23; 收到修改稿日期: 2009-11-25

作者简介: 杨建强(1982—),男,博士研究生,主要从事新型环形激光器的理论方面的研究。

E-mail: yjqyj_q_yjq@163.com

了如何削弱这些因素的影响,从工程应用角度找出减小开机零漂的途径,对改善四频陀螺温度特性有参考价值。

2 四频差动激光陀螺开机零漂的物理机制

四频差动激光陀螺基本结构如图 1 所示。其中 M1, M3 和 M4 为三个反射镜, M2 为半反半透镜, 用于输出信号光。M3, M4 背面装有压电陶瓷, 用于稳频时调节腔长。其中 1, 2, 3 分别为法拉第室、水晶片、增益管, 4, 5, 6 分别对应阴极和双阳极区域, 陀螺内部充有按一定比例混合的 He-Ne 气体用于放电发光。

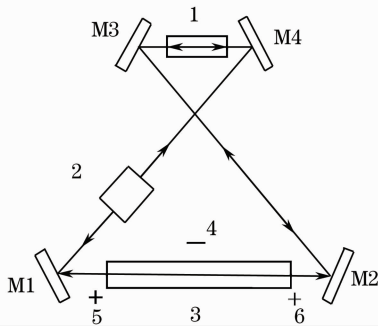


图 1 四频差动陀螺结构示意图

Fig. 1 Configuration diagram of four-frequency differential laser gyro

陀螺从冷却状态启动时, 阴阳极间产生上千伏高压, 增益管气体放电产生能量。能耗中只有几毫瓦用于维持激光输出, 大部分以热量形式散发出去。热量一方面沿着毛细管在腔内传播, 另一方面通过腔体玻璃块向外传导。随着整个陀螺块温度升高, 外表面温度梯度增大, 热量传给周围空气。当产生的热量与散发到周围环境的热量相等时, 陀螺达到平衡状态^[9]。这一过程中, 至少有以下变化: 1) 放电气体气压和各成分变化, 导致增益下降; 2) 气体粘滞系数和流速变化, 引起朗缪尔流动变化; 3) 水晶片、法拉第室热变形, 左右旋光电管温度特性不对称, 导致稳频位置变化; 4) 整个陀螺受热膨胀, 反射镜位置倾斜, 压电陶瓷歪扭等引起腔体变形; 5) 法拉第玻璃费德尔系数和几何尺寸变化, 导致偏频量变化; 另外还有反射镜膜片偏振性能的变化等。

总体来看, 陀螺自身发热引致热量交换是因, 上述参量变化是果, 而这些参量变化又成为新的“因”, 共同影响着开机零漂, 图 2 是典型的开机零漂曲线^[7]。

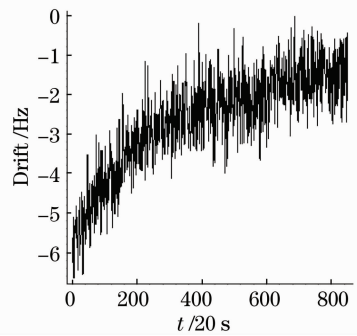


图 2 典型陀螺开机零漂曲线

Fig. 2 Typical curve of laser gyro startup null drift

3 减小开机零漂的方法

3.1 采用色散平衡技术减小陀螺零漂对稳频位置的敏感性

稳频是四频陀螺的重要误差因素^[12], 光强差稳频的缺点也众所周知, 特别在开机预热过程中, 水晶片、法拉第室热变形和左右旋光电管温度特性不对称使稳频精度大为下降, 造成较大零漂^[4]。以往研究都是从提高稳频精度的环节入手^[12~14], 现在从源头上解决问题, 即减小陀螺零漂对稳频位置的敏感性。

四频差动陀螺工作原理如图 3 所示。其中横、纵轴代表频率 ν 和增益 G , I_1, I_2 为顺、逆时针传播的左旋对模, I_3, I_4 为逆、顺时针传播的右旋对模, $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$ 分别为四模频率和增益曲线中心频率, ω_H 为法拉第偏频量。由四频陀螺零漂公式^[5]

$$\dot{\psi}_{12} - \dot{\psi}_{34} = (A^L - A^R)\omega_H + \text{others}, \quad (1)$$

式中 $\dot{\psi}_{12}, \dot{\psi}_{34}, A^L$ 及 A^R 分别表示左右旋对模拍频和比例因子修正值, 和稳频无关的其他项没有列出。 A^L, A^R 与左右旋对模的稳频位置有关, 由于增益曲线不完全对称和光强差稳频的缺点, $A^L - A^R \neq 0$, 而稳频精度局限又造成 $(A^L - A^R)$ 值在 0.5×10^{-6}

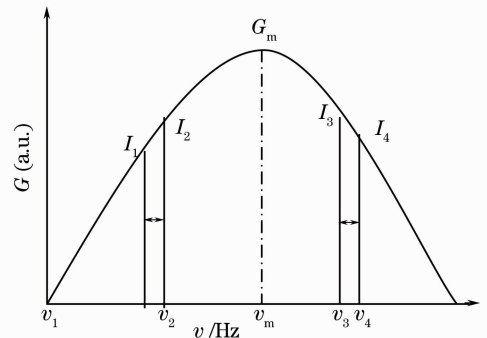


图 3 四频差动陀螺工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four-frequency differential laser gyro principle

量级波动。 ω_H 为数百千赫兹,这就造成陀螺零漂对稳频位置很敏感。如开机预热时稳频精度为 2.5 MHz,会导致约 2.3 Hz 的零漂^[4]。 $A^L\omega_H$ ($A^R\omega_H$) 表征了左(右)旋对模受介质色散效应修正量的差值^[2],这来源于对模相对于增益曲线中心有 ω_H 大小的距离差。若能使对模 I_1, I_2 (或 I_3, I_4) 相对于增益曲线中心距离相等,则陀螺零漂不受稳频位置影响,即是色散平衡的思想^[15]。色散平衡可通过在增益区加上一定大小方向的纵磁场 H 来实现,如图 4 所示,设磁场为逆时针方向,增益曲线产生 ω_H 大小的正负旋分裂, $\omega_H \propto H$ 。实际方案中,可在陀螺玻璃块增益区附近打数对孔,然后绕上线圈,通以一定大小方向的电流产生纵向磁场。多次实验表明,色散平衡技术使开机零漂幅度明显减小。

3.2 采用自动增益控制回路稳定光强

激光陀螺通过 He-Ne 气体放电提供激光增益,气体总气压、气压比、温度和放电电流等都会引起增益不稳定,尤其表现在开机预热阶段^[16]。在目前陀

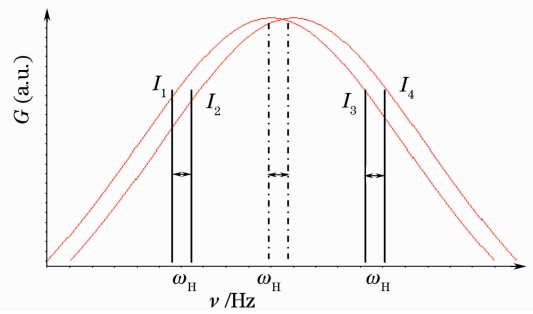


图 4 色散平衡原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dispersion equalization principle

螺工艺和稳频精度下,增益不稳定直接表现为光强不稳定,而(1)式右边几乎所有项数学表达式中都含有光强^[5],因此光强不稳定将直接影响陀螺零漂。以往的研究大多强调稳定陀螺放电电流^[17],实际上稳电流不等于稳增益,也不可能使光强稳定^[1]。如图 5 所示,放电电流稳定度达 2×10^{-6} A (图中所示电流值已减去平均值),但光强并没有稳住,尤其在开机阶段变化达 5.6%。现在采用自动增益控制回路稳定光强。

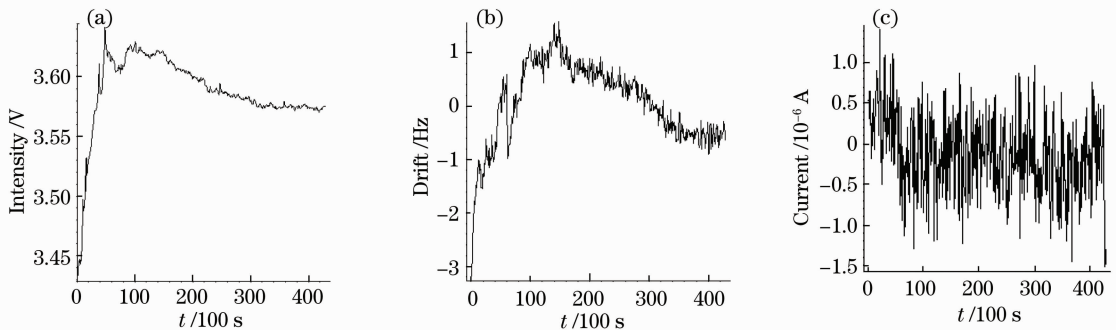


图 5 (a)光强变化曲线;(b)零漂变化曲线;(c)电流变化曲线

Fig. 5 (a) curve of light intensity; (b) curve of null drift; (c) curve of gyro current

如图 6 所示,陀螺光信号通过光电管和前置放大电路,得到直流光强信号 I_D 和交流光强信号 I_A , I_A 经计数电路解调出拍频值。 I_D 一方面经过稳频电路,输出控制信号驱动压电陶瓷;另一方面经过光强控制电路,输出控制信号到陀螺高压电源。整个系统就构成了自动增益控制回路。经反复实验,采用自动增益控制回路后,不仅开机零漂下降了一定幅度,长时间零漂稳定度也改善很多,使得增益变化引致的零漂波动成分被去除。

3.3 采用空间异面腔结构消除水晶片负性影响

国内现有绝大多数四频差动陀螺腔内存在水晶片和法拉第室,带来如差分损耗、应力双折射、背向散射等负性影响,极大地制约了陀螺精度的提高和

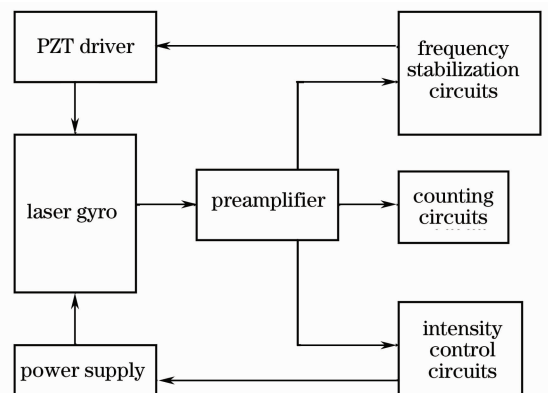


图 6 自动增益控制回路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of auto-gain control loop

随机游走性能的改善^[18]。而水晶片由于安装应力不当、光路不过光轴和热膨胀不均匀等因素,在相当长时间内成为限制陀螺性能的首要瓶颈^[19,20]。特别是开机预热阶段,陀螺发热造成水晶片变形和应

力变化,而这些变化在一定程度上是不可预测的,故造成的开机零漂现象也是多种多样。如图7所示,不同时刻开机,零漂趋势和大小各有不同,经反复实验研究,确认这些现象来自水晶片。

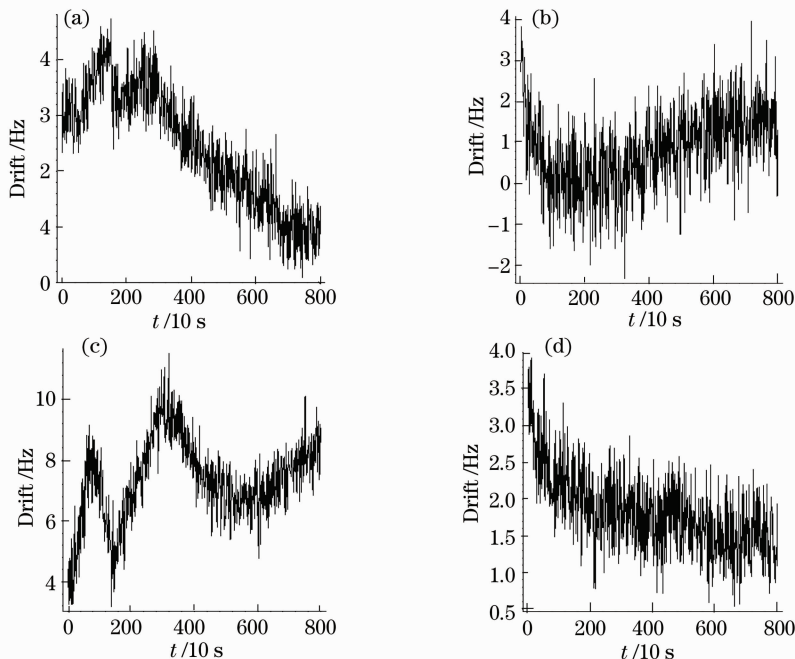


图7 水晶片存在时的典型开机零漂曲线

Fig. 7 Typical curves of startup null drift when the quartz crystal exists

以往的研究总是围绕水晶片安装工艺、材料选择等方面下功夫^[10,19,20],而将水晶片去掉则是更为有效彻底的方法。异面腔结构利用空间环路旋光效应^[21,22],根据所需旋光量合理设计四个反射片的空间位置,完全可代替水晶片,这样就消除了水晶片的负性影响。对自主研发的空间四频陀螺进行了一年多测试,和平面四频陀螺相比,光强明显增强,随机游走系数变小,零偏重复性改善。而开机零漂性能也明显改善,表现在每次开机零漂变化趋势相同,零漂幅度下降了一半以上,这和预先的理论分析也是吻合的。

3.4 其他因素的解决办法

实验中还发现,陀螺屏蔽盒的设计对减小开机零漂很重要。不仅要考虑磁屏蔽效率,还要考虑屏蔽盒的形状、布局以及一些附件的位置,这些共同构成陀螺的周围小环境,周围小环境的热效应会影响零漂性能。某种具有四周对称散热通道的屏蔽盒,有利于加快陀螺和外界的热平衡过程,可使开机预热时间缩短到15 min。故优化屏蔽盒的热布局设计有利于缩短开机时间。

陀螺电路在开机几十分钟内也存在一定程度的

不稳定,这和电子元件性能有关,因此需采用温漂性能好、抑噪能力强的电子器件,还要优化电路设计方案,同时要对电子线路印刷板做抗干扰测试和改进。

这里需要指出,开机预热过程中,腔体变形是个很严重的问题,这将导致谐振腔闭环光路不稳定,进而带来包括朗缪尔流动效应在内的多种零漂^[23]。因此需采用残余应力小的压电陶瓷^[24]、加工精度高的反射镜^[25]、低膨胀微晶玻璃、优化的陀螺粘结装配工艺以及新型控制镜技术。值得注意的是,法拉第室热变形问题是个难点。采用空间异面腔结构将水晶片去掉,但法拉第旋光玻璃仍需保留。开机预热时玻璃产生热变形,两端面光散射分布变化和折射率变化等都会带来陀螺零漂^[26],因此寻找热膨胀系数小、折射率温度系数小、费德尔系数大和易于加工镀膜的磁旋光玻璃将是下一步工作方向。

4 实验结果

对采用文中所述方法的某型空间四频陀螺进行了多次测试,得到如图8所示典型开机零漂曲线。从图中可看到,开机约15min零漂即达到稳定状态,

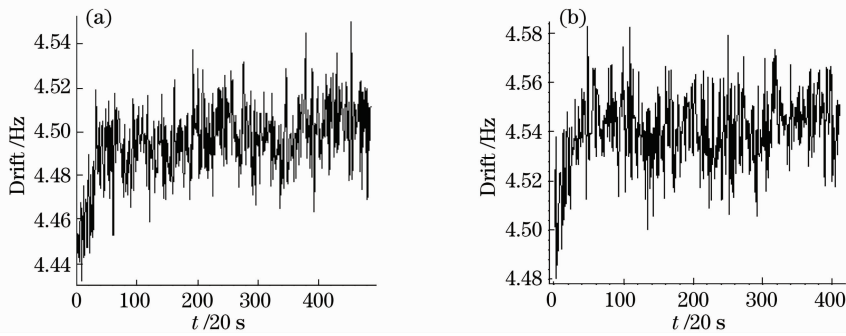


图 8 采用文中所述方法后的开机零漂曲线

Fig. 8 Curve of startup null drift after adopting the methods presented in this paper

初始值和稳定值相差在 0.1 Hz 以内,后来稳定值有些许波动,这是陀螺本身慢漂特性所致,但相比图 2 已有很大改善。这就验证了上述方法的有效性,实际上这些方法对改善陀螺高低温性能同样有效。

5 结 论

四频差动激光陀螺开机零漂性能对于快速启动场合有重要意义,文中所述的各种方法,紧扣陀螺开机零漂的物理机制,从源头上解决问题,实际上开机零漂涉及的因素很多,在现有技术水平下,有些因素可以控制,有些只能暂时提出解决方向,为今后的陀螺设计提供参考。

参 考 文 献

- Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984
- Jiang Ya'nan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1985
- Chen Linfeng, Han Zonghu, Chen Yong *et al.*. 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, 陈勇等. 激光陀螺磁灵敏度特性研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 974~976
- Yuan Jie, Huang Yun, Han Shengjie *et al.*. The null shift of the differential laser gyro caused by the asymmetry of the left and right gyro's SFC[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 22~24
袁杰, 黄云, 韩生节等. 四频差动激光陀螺由于稳频精度局限等引入的零漂[J]. 激光杂志, 2002, **23**(3): 22~24
- Gao Bolong. The locking phenomenon of the second kind in differential laser gyro[J]. *J. National University of Defense Technol.*, 1982, **4**(1): 37~57
高伯龙. 四频差动陀螺中的第二类闭锁效应[J]. 国防科技大学学报, 1982, **4**(1): 37~57
- Yuan Jie, Long Xingwu. The magnetic effect of the differential laser gyro and the choose of heating element[J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(8): 145~147
袁杰, 龙兴武. 四频差动激光陀螺磁效应研究及加热器件的选择[J]. 应用激光, 1999, **19**(8): 145~147
- Wu Guoyong, Gu Qitai. Temperature's effect on four frequency RLG bias[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(3): 198~200

- 吴国勇, 顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. 光学技术, 2002, **28**(3): 198~200
- Wang Guochen, Yang Jianqiang. Correlation of differential laser gyro's performance and room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1058~1061
王国臣, 杨建强. 四频激光陀螺性能与室温的相关性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1058~1061
- Wu Guoyong, Gu Qitai. Thermal bias mechanism of four mode multi-oscillation ring laser gyro [J]. *J. Chinese Inertial Technol.*, 2002, **10**(4): 44~48
吴国勇, 顾启泰. 四频激光陀螺热致零漂机理研究[J]. 中国惯性技术学报, 2002, **10**(4): 44~48
- Xiao Guangzong, Zhang Bin, Long Xingwu *et al.*. Mechanism of temperature's effect on differential laser gyro bias[J]. *J. Chinese Inertial Technol.*, 2007, **15**(4): 481~484
肖光宗, 张斌, 龙兴武等. 温度对四频差动激光陀螺零偏的影响机理[J]. 中国惯性技术学报, 2007, **15**(4): 481~484
- Zhao Xiaoning, Li Xianluo, Lei Baoquan. Temperature compensation for ring laser gyro [J]. *J. Chinese Inertial Technol.*, 2004, **12**(3): 55~57
赵小宁, 李县洛, 雷宝权. 激光陀螺零偏温度补偿研究[J]. 中国惯性技术学报, 2004, **12**(3): 55~57
- Xu Guangming, Zhang Bin, Jiang Anguo *et al.*. Laser frequency stabilization for differential ring lasers[J]. *J. Opto-Electronics • Laser*, 2000, **11**(1): 49~50
许光明, 张斌, 蒋安国等. 四频差动激光陀螺中的激光稳频[J]. 光电子·激光, 2000, **11**(1): 49~50
- Li Junqiao, Qin Shiqiao, Wang Changping *et al.*. Simulation of frequency stabilization control for differential ring lasers [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 92~94
李君桥, 秦石乔, 王昌平等. 四频差动激光陀螺稳频控制仿真[J]. 光学技术, 2008, **34**(1): 92~94
- Yang Jianqiang, Liao Dan. Preliminary study of dithering frequency stabilization for four frequency differential laser gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2256~2260
杨建强, 廖丹. 四频差动激光陀螺小抖动稳频初步研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2256~2260
- T. W. Hahn, D. A. Tazartes, J. G. Mark. Active magnetic field tuning for dispersion equalization of a multi-oscillator[P]. US Patent 5374990, 1994-12~20
- Yuan Jie, Huang Yun, Jiang Anguo. The thermo effect of the laser gyro and the measuring of it's temperature [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(4): 46~48
袁杰, 黄云, 蒋安国. 四频差动激光陀螺的热效应浅述与其温度分布的测试[J]. 激光杂志, 2000, **21**(4): 46~48
- Zhang Qinghua, Lu Guangfeng, Long Xingwu. Monitoring the discharge status of three-axis laser gyro [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(3): 73~76
张庆华, 卢广锋, 龙兴武. 三轴激光陀螺放电状态监控[J]. 光电

- 工程, 2008, **35**(3): 73~76
- 18 Yang Jianqiang. Design of 8-like non-planar cavity [J]. *Semiconductor Photonics and Technol.*, 2008, **14**(4): 229~233
- 19 Sun Gang, Jin Shilong. Analysis of Jones matrix of birefringent crystal[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(4): 17~21
- 孙 刚, 金世龙. 双折射晶体琼斯矩阵分析[J]. *应用光学*, 2005, **26**(4): 17~21
- 20 Gao Bolong. Several optical properties of quartz (1) [J]. *J. National University of Defense Technol.*, 1982, **4**(1): 59~71
- 高伯龙. 水晶片的几个光学性能(一)[J]. *国防科技大学学报*, 1982, **4**(1): 59~71
- 21 M. R. Dickinson, T. A. King. Polarization frequency splitting in non-planar ring laser resonators[J]. *J. Modern Optics*, 1987, **34**(8): 1045~1055
- 22 H. R. Bilger, G. E. Stedman, P. V. Wells. Geometrical dependence of polarisation in near-planar ring lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1990, **80**(2): 133~137
- 23 Gao Bolong, Jiang Ya'nan. Zero drift effects in the Langmuir flow[J]. *J. National University of Defense Technol.*, 1980, **3**(3): 33~50
- 高伯龙, 姜亚南. 朗缪尔流动的零漂效应[J]. *国防科技大学学报*, 1980, **3**(3): 33~50
- 24 Zhao Shen. The study of distortion problem in RLG [J]. *Navigation and Control.*, 2005, **4**(2): 26~28
- 赵 申. 激光陀螺中歪扭问题的研究[J]. *导航与控制*, 2005, **4**(2): 26~28
- 25 Du Jianbang. Choice of the mirror used for the path length control of a laser gyro [J]. *Aerospace Control.*, 1998, **16**(4): 64~67
- 杜建邦. 激光陀螺稳频反射镜的选择[J]. *航天控制*, 1998, **16**(4): 64~67
- 26 Jin Shilong, Li Xiaohong, Yang Kaiyong *et al.*. Arts of Faraday effect element of the four mode RLG [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 22~25
- 金世龙, 李晓红, 杨开勇 等. 四频差动激光陀螺法拉第旋光片的加工[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 22~25