

文章编号:1004-4213(2011)03-0370-5

## 激光陀螺增益特性的实验研究

何小庆<sup>1</sup>,张振辉<sup>2</sup>,高爱华<sup>1</sup>,叶萍<sup>2</sup>,胡尚斌<sup>1</sup>,陆治国<sup>1</sup>

(1 西北大学 物理学系,西安 710069)

(2 西安飞行自动控制研究所,西安 710065)

**摘 要:**采用测量侧光谱相对强度的方法研究激光陀螺的增益特性.通过实验得到了陀螺增益随着工作电流的增加而增加,随着总气压的升高会出现饱和增益现象,在总气压大约为  $4P_0$  时增益取极大值.通过比较铝阴极和另一种阴极材料 B 的激光陀螺在启动阶段增益随时间变化的特性曲线和对测量数据进行误差分析,发现陀螺的增益稳定性和抗外界环境干扰能力是与阴极材料密切相关的.激光介质的增益和由朗缪尔流效应引起的拍频频移都和产生激光的上下能级粒子数密度差有关,实验结果说明用增益的稳定性可以评价激光陀螺零点漂移稳定性.

**关键词:**侧光谱;相对强度;增益系数;增益稳定性;零点漂移

**中图分类号:**V241.62+2

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114003.0370

### 0 引言

激光陀螺是现代国防中广泛使用的一种惯性导航仪器.它实质上是一个环形气体激光器,依靠环形振荡器双向行波的拍频输出,对惯性角速度、角位移进行感测.增益是激光器的主要质量指标之一.激光器的输出功率、单色性、方向性等几乎一切特性以及对激光器采用的技术措施如稳频、选模、锁模等都与增益特性有关,增益的大小及变化影响着激光器能否产生振荡,是否容易振荡及输出激光强弱的问题.因此对环形激光器激活介质增益特性进行研究有助于加深增益介质对激光器输出特性作用及其影响规律的了解,有利于对激光陀螺性能的改善和提高.

目前,对环形激光器激活介质增益特性进行研究并用增益作为激光陀螺性能评价参量的文章很少.20 世纪 80 年代初期就有关于增益的径向分布对激光陀螺拍频输出影响的论文<sup>[1-3]</sup>,但是没有环形激光器增益特性随工作条件的变化以及用增益特性随时间的变化来评价陀螺的零点漂移这方面的研究报道.本文通过对环形 He-Ne 激光器  $\lambda$  和  $\lambda_1$  两条侧光谱线相对强度的测量,研究波长为  $\lambda$  的激光增益特性随工作电流、总气压和阴极材料等工作条件的变化规律,重点通过对陀螺启动后增益随时间变化特性的测量来评价陀螺零点漂移的稳定性.

### 1 激光陀螺增益的实验测量方法

激光器增益的实验测量方法可以根据不同的实验条件及研究需要进行选择,文献[4]描述了一种激光增益的实验测定方法,该方法因实验操作过程复杂而不利于测量.更普遍的激光增益测量方法是通过侧光谱线相对强度的测量来计算增益,该方法由美国科学家在 20 世纪 80 年代初提出,由于实验相对简单,计算所涉及的参量较少,所以该方法不失是一种简单易行的激光器增益的测量方法.本文采用此方法对激光陀螺的增益特性进行了实验研究.

利用侧光谱测量增益的理论依据为<sup>[5]</sup>

$$G(\lambda) = \frac{1}{8\pi} \left( N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) A_{21} \lambda^2 \quad (1)$$

式中  $N_2 = \frac{I_{21}\lambda}{A_{21}hc}$ ,  $N_1 = \frac{I_{10}\lambda_1}{A_{10}hc}$  分别为上下能级粒子数密度;  $g_2, g_1$  分别为上下能级的统计权重;  $A_{21}, A_{10}$  分别为上下能级的自发辐射系数;  $I_{21}, I_{10}$  分别为波长为  $\lambda, \lambda_1$  的侧光谱线强度.由于实验测得的是侧光谱线的相对强度,因此所得到的增益系数也是一个相对值,其数值是与所采用的实验系统装置密切相关的.但不同谱线增益的相对大小及其随实验条件变化的本质规律不会改变.

从式(1)可知,只要测出波长  $\lambda, \lambda_1$  在  $t$  时刻的

基金项目:航空科学基金(No. 20090898001, No. 20090898002)和西北大学研究生自主创新实验(No. 09YZ54)资助

第一作者:何小庆(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为环形气体激光器及离子体放电. Email: sally\_hexiaoqing@126.com

导师(通讯作者):高爱华(1964-),女,副教授,主要研究方向为气体放电和低温等离子体应用. Email: gaoaihua@nwu.edu.cn

收稿日期:2010-09-13;修回日期:2010-12-04

相对侧光谱线强度,便可根据上述公式计算出波长为 $\lambda$ 的谱线在 $t$ 时刻 $z$ 处的陀螺增益.为了提高实验数据处理的速度和准确度,并能形象直观地反映增益随不同条件或输出参量的变化关系,我们借助MATLAB软件,通过编程对实验测量数据进行处理,并将计算结果以曲线的形式进行显示.

由于He-Ne气体激光器是多谱线激光器,能级跃迁复杂,为了提高增益测量的稳定性,本课题组在实验前期通过大量反复的实验测量,对实验系统及条件进行优化.考虑到实际应用中大多采用632.817 nm这条谱线以及实验测量过程中谱线跃迁的相对稳定特性,因此选择 $\lambda=632.817$  nm和 $\lambda_1$ 两条谱线作为研究对象;实验采用美国生产的光栅光谱仪,其光谱测量准确度为0.001 nm,光谱采集为光纤探头,由于放电毛细管管径很小,测量到的光强度是光纤入光口径与激光陀螺放电毛细管耦合区域的时间积分值,因此可以认为所测激光陀螺增益的径向分布是均匀的;为了提高光强测量的准确度,对光谱仪进行了光谱强度校正;为了提高光强读数的重复性,选择了合适的小波段作为其相应的强度值;针对入射光强大小、探测器的灵敏度以及光谱仪分辨率的测量要求,选择了合适的狭缝宽度等.

## 2 实验结果

### 2.1 增益随工作电流的变化

工作电流是决定陀螺工作性能的重要电参量,在总气压和气体比(皆为通常工作取值)不变的情况下,考虑到陀螺工作时实际的电流大小,我们测量了工作电流在0.3~2 mA范围内变化时增益的变化情况,实际所测量的陀螺增益随工作电流变化的特性如图1.

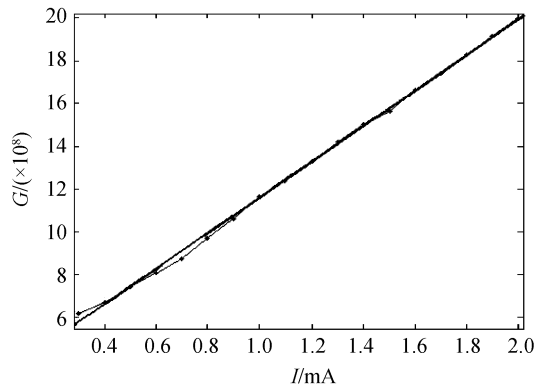


图1 激光陀螺增益随工作电流的变化

Fig. 1 The gain of laser gyro vs. the current

由图1可以看出在所测量的电流范围内增益随工作电流的增加而线性增加,其斜率为8.325,即增益对工作电流的变化十分敏感,这必然会对陀螺的输出特性产生很显著的影响.因此,应根据陀螺的工

作性能要求选择合适的工作电流并保持其稳定是十分关键的.

### 2.2 气体总气压增加的饱和增益现象

在工作电流和气体组分比不变的情况下,气体总气压就成了决定激光陀螺工作性能的重要参量,且当气体组份比与总气压处于最佳工作状态附近区域时,它们的微小变化对陀螺激光输出功率的影响是很小甚至是可以忽略的.因此为了寻找陀螺最佳工作状态时的总气压,通过实验测量了增益和侧光谱线相对强度随总气压的变化情况.测量结果如图2和图3,图中 $P_0$ 为单位总气压值.

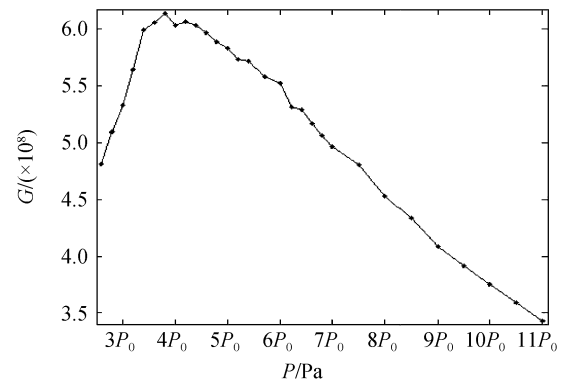


图2 激光陀螺增益随总气压P的变化

Fig. 2 The gain of laser gyro vs. the total pressure

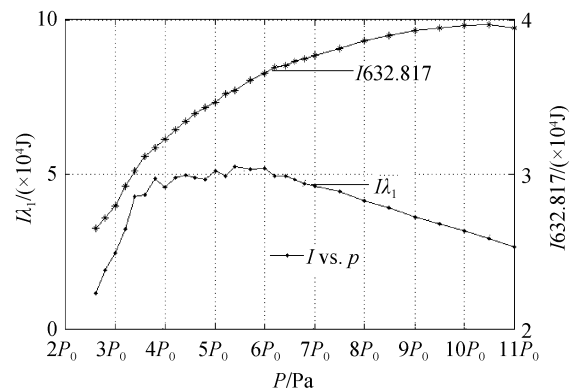


图3 实验所测得的侧光谱线632.817 nm与 $\lambda_1$ 的相对强度随总气压(Pa)的变化

Fig. 3 The side spectrum's relative strength for 632.817 nm and  $\lambda_1$  measured experimentally vs. the total pressure

从图2中可以看到明显的饱和增益现象,当总气压约为 $4P_0$ 时,增益达到最大值,当总气压继续增加时,增益反而迅速减小.从图3中可以看到所测得的侧光谱线632.817 nm与 $\lambda_1$ 的相对强度取极大值的总气压明显不同,这显然是有利于陀螺工作的;当总气压较低时,随着总气压的增加两条谱线的强度均增加,当总气压为 $5P_0$ - $6P_0$ 时,侧光谱线 $\lambda_1$ 的光强达到最大,之后迅速减小,当总气压约为 $10.5P_0$ 时,侧光谱线632.817 nm的光强才达到最大.

### 2.3 陀螺启动后增益随时间的变化情况

在陀螺的点火启动阶段,陀螺要经过一定的时

间才能从不稳定的工作状态进入到稳定工作状态,对实际应用而言陀螺的这个不稳定工作时间越短越好.对陀螺不稳定工作状态的机理进行研究已成为改进陀螺性能的主要问题之一.

为了探究陀螺不稳定工作状态的变化规律及受不同材料阴极的影响,本文测量了陀螺启动后 80 min 内,陀螺的增益与输出光强随时间的变化情况.从激光陀螺输出功率和增益的波动可以得到,所测陀螺在开机启动阶段其增益和输出光强均不稳定,这是由于激光陀螺在开机启动预热阶段,激光增益区的气体总气压、气压比、温度和放电电流的不稳定都会引起增益的不稳定,进而直接表现为光强的不稳定,而对于陀螺的拍频输出来说光强的不稳定将直接影响陀螺的零漂特性<sup>[6]</sup>.因此用增益的稳定与否作为零漂稳定性的评价判据是有其本质原因的.

与此同时测量了铝阴极陀螺与 B 阴极陀螺增益随时间的变化情况,结果如图 4.从图 4 中可以直观地看到 B 阴极的增益稳定性优于铝阴极,而且铝阴极增益离散性也较大.通过对实验测量数据进行误差处理,用马尔科夫判据  $D$  和标准偏差  $\delta$  等对增益稳定性进行定量分析,结果如表 1.表 1 给出了 B 阴极与铝阴极陀螺增益稳定性评价参量对照表,其中  $D$  为马尔科夫判据; $\bar{X}$  为算术平均值; $\delta$  为标准偏差; $\frac{\delta}{\bar{X}}$  为偏差百分比.

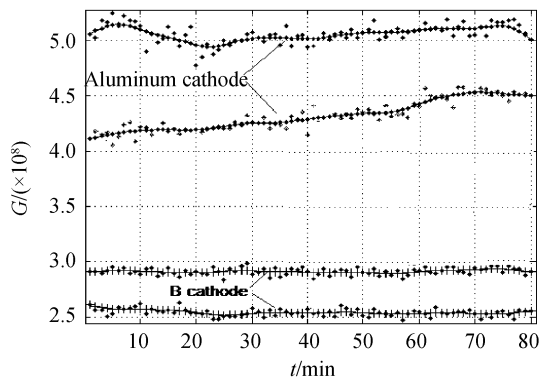


图 4 铝阴极与 B 阴极激光陀螺增益随时间的变化情况  
Fig. 4 Gain vs.  $t$  for gyros with B cathode and aluminum cathode

表 1 铝阴极与 B 阴极激光陀螺增益测量的误差分析  
Table 1 The error analysis of experimental data for B cathode and aluminum cathode laser gyros

| Different cathode materials | Number of measurements | $D(\times 10^8)$ | $\bar{X}(\times 10^8)$ | $\delta(\times 10^8)$ | $\frac{\delta}{\bar{X}}$ |
|-----------------------------|------------------------|------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Aluminum cathode            | 1                      | -8.776           | 4.320                  | 0.1380                | 0.032                    |
|                             | 2                      | -2.076           | 5.063                  | 0.0888                | 0.018                    |
| B cathode                   | 1                      | 0.526            | 2.542                  | 0.0329                | 0.013                    |
|                             | 2                      | -0.012           | 2.913                  | 0.0317                | 0.011                    |

由表 1 可知:

1) 增益的变化有累进趋势:无论是铝阴极还是 B 阴极激光陀螺,其增益都有累进现象,但 B 阴极激光陀螺的增益累进效应比较小.

用马尔科夫判据能够判断系统是否存在累进性误差,评价参量为  $D$ .当参量  $D$  显著的异于零时,说明系统存在累进性误差.累进性误差的存在会严重影响测量结果,同时也反映了漂移的线性增大,进而会导致陀螺增益系数的线性上升.从表 1 可以看出铝阴极陀螺的  $D$  参量几乎比 B 阴极的大一个数量级,说明铝阴极陀螺较 B 阴极陀螺存在较为严重的累进性误差,其增益稳定性也没有 B 阴极陀螺好.

2) 增益随机变化的分散性:算术平均值  $\bar{X}$  是真实值的一种最佳估计,标准偏差  $\delta$  是表征测量结果的分散程度的, $\delta$  越小说明测量系统的随机误差就越小, $(\bar{X} \pm \delta)$  反映测量结果出现在该区间的概率为 68.3%.从表 1 中可以看出铝阴极的  $\delta$  值是 B 阴极的 2~4 倍,说明铝阴极陀螺增益的分散程度远大于 B 阴极陀螺,从而反映了 B 阴极陀螺的增益比铝阴极陀螺的增益稳定.

3) 环境因素对增益的影响:对激光陀螺增益的测量除了受工作条件如放电电流、总气压、探测器的工作状态等宏观可控量的影响外,环境因素如温度、湿度、空气流动性等也是不能忽视的因素.每次测量中陀螺增益的大小可用  $\bar{X}$  表示,如果在工作条件基本稳定的条件下, $\bar{X}$  的变化在一定程度上就反映了测量结果对环境的敏感程度.表 1 中铝阴极激光陀螺两次测量的增益差值为 0.743, B 阴极的增益差值为 0.371,可见铝阴极激光陀螺的增益对环境更敏感,抗外界环境干扰的能力差.

综上所述可以得出, B 阴极激光陀螺的增益稳定性优于铝阴极,即不同阴极材料对陀螺的增益和抗外界环境干扰的能力影响不同,这也为后续工作中对陀螺阴极材料及其加工工艺的研究做了很好的实验支持.

### 3 增益稳定性与零点漂移间的关系

朗缪尔流效应是引起激光陀螺零点漂移的主要原因之一.由于朗缪尔流效应的存在会在陀螺输出的拍频信号上叠加一项频率附加项,这一频率附加项就构成了零点漂移的主要部分.由朗缪尔流效应引起的拍频频率附加项可表示为<sup>[6]</sup>

$$\nu_L \propto \left| \frac{N_2 \mu_2 - N_1 \mu_1}{N_2 - N_1} \right| \quad (2)$$

式中  $\nu_L$  表示朗缪尔流效应引起的光拍频率附加项,称为拍频频移; $N_1, N_2$  分别为上下能级的粒子数密度; $\mu_1, \mu_2$  分别表示上下能级原子的宏观迁移速率.

由式(1)可得

$$G \propto \Delta N = N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \quad (3)$$

由式(2)可知,由朗缪尔流效应引起的拍频频移与上下能级的粒子数密度差成反比关系.同时由式(3)可知,增益的大小也与产生激光的上下能级的粒子数密度差有关,是成正比关系.图5是实验所测得到的增益和由朗缪尔流效应引起的拍频频移随时间的变化曲线.由图5可知,两条曲线的整体变化具有反相似性,即将增益(拍频频移)变化曲线翻转 $180^\circ$ 就可得到拍频频移(增益)变化曲线,因此,二者的稳定性具有相似性,也就是说可以用增益的稳定性在一定程度上来反映零点漂移的稳定性.

图5与图6中diffrequency为朗缪尔流效应引起的拍频频率附加项,即拍频频移.纵坐标对应的量值为归一化后的增益和拍频频移.

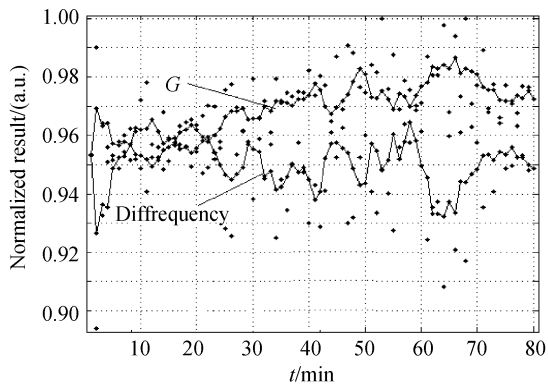


图5 陀螺启动阶段增益与拍频频移随时间的变化  
Fig. 5 The gyro gain and beat frequency shift vs.  $t$  at the start-up phase

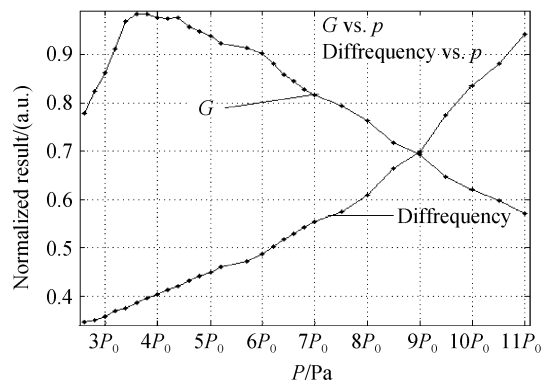


图6 增益与拍频频移随总气压的变化  
Fig. 6 Gain and the beat frequency shift vs. the total pressure

图6给出了增益和拍频频移随总气压的变化曲线.由图6知,由朗缪尔流效应引起的拍频频移随着

总气压的升高而不断升高.说明气压越高,朗缪尔流效应越强烈,零点漂移的稳定性越差.

## 4 结论

1)通过实验测量得到了激光陀螺相对增益系数随着工作电流的增加而增加,随着气体总气压的升高会出现饱和增益现象;

2)通过对铝阴极与B阴极两种不同阴极材料的激光陀螺在启动后增益随时间变化特性的测量,并对测量数据进行误差处理,发现B阴极激光陀螺的增益稳定性和抗外界环境干扰能力都要优于铝阴极激光陀螺;

3)通过对增益随时间变化和由朗缪尔流效应引起的拍频频移随时间变化特性曲线的实验比较,同时通过对理论公式的分析,说明可以用增益的稳定性来评价零点漂移的稳定性.本研究工作对激光陀螺性能的改善和提高具有指导意义.

### 参考文献

- [1] LIAO Fu-zhong. Langmuir flow effect in a ring cavity during the light deflection[J]. *Laser*, 1979, **6**(12):1-7.  
廖复中. 环形腔中光线偏斜时的朗缪尔效应[J]. *激光*, 1979, **6**(12):1-7.
- [2] GAO Bo-long, JIANG Ya-nan. Langmuir flow effects in laser gyro drift[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1980, **31**(8): 33-51.  
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, **31**(3):33-50.
- [3] JIANG Ya-nan. A theoretical analysis of langmuir flow in the ring laser[J]. *Journal of Tsinghua University*, 1980, **20**(4): 1-8.  
姜亚南. 环激光中 Langmuir 流效应的理论分析[J]. *清华大学学报*, 1980, **20**(4):1-8.
- [4] CHENG Lin, YU Xue-cai, HUANG Yu-hong, et al. An experiment of measuring gain coefficient in an inhomogeneous broadening laser[J]. *Experimental Science and Technology*, 2007, **5**(5):9-10.  
程琳,余学才,黄宇红,等. 非均匀加宽激光器的增益系数测量[J]. *实验科学与技术*, 2007, **5**(5):9-10.
- [5] 黄植文,黄显玲. *激光实验*[M]. 北京:北京大学出版社,1996: 24-36.
- [6] YANG Jian-qiang, LUO Yun, LIAO Dan. Study on the startup null drift characteristic of four-frequency differential laser gyro[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, **30**(6):1709-1714.  
杨建强,罗云,廖丹. 四频差动激光陀螺开机零漂特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6):1709-1714.
- [7] YUAN Xiao-dong, GAO Bo-long, ZENG Ming, et al. Langmuir flow effects in ring laser gyros[J]. *China Laser*, 1998, **25**(7):627-631.  
袁晓东,高伯龙,曾明,等. 激光陀螺中的朗缪尔流动效应[J]. *中国激光*, 1998, **25**(7):627-631.

## Experimental Investigation on the Gain Characteristics of Laser Gyro

HE Xiao-qing<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hui<sup>2</sup>, GAO Ai-hua<sup>1</sup>, YE Ping<sup>2</sup>, HU Shang-bin<sup>1</sup>, LU Zhi-guo<sup>1</sup>

(1 *Department of physics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(2 *Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China*)

**Abstract:** The gain characteristics of laser gyro were investigated by measuring the relative strength of the laser gyro's side spectrum. It was obtained experimentally that the gain of the laser gyro increases with the increasing of the current, the gyro gain presents the saturated gain phenomena with the increasing of the total pressure and the gain reaches a maximum value when the total pressure is about equal to  $4P_0$ . By comparing the time-varying gain curves of aluminum cathode and B cathode gyroscope in the gyro's start-up phase and carrying out error analysis of experimental data, the experimental results show that the gain stability and anti-environmental interference capability of B cathode gyro are better than that of aluminum cathode gyro. The gain of active medium and the beat's frequency shift induced by the Langmuir flow effects both are related to the population density difference of the producing laser's upper and lower level. The experimental results show that the zero drift's stability of the laser gyro can be evaluated by the gyro gain's stability.

**Key words:** Side spectrum; Relative strength; Gain coefficient; Gain stability; Zero drift