

氦氖气体参数对环形激光陀螺光强输出的影响

徐小清, 谭中奇, 樊振方*, 张斌, 赵洪常

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 为探究腔内各气体的压强比对激光陀螺特性的影响,从等离子色散函数出发,探究气压气比对环形腔内光强调谐曲线的影响,同时使用自制的环形激光陀螺进行工程试验。搭建了一套可操作性强、气压气比可调节且可实时监测的充气实验装置,得到该激光陀螺输出增益随气压气比的变化关系,从而得出最佳的工作气压气比。结果表明:激光输出增益首先随着气压的增大而增大,当气压增大到某一气压值时,输出增益达到最大值;之后输出增益随着气压的增大而减小,当气压增大到某一临界值时无激光输出。

关键词 激光器; 环形激光陀螺; 功率调谐曲线; 氦氖气体参数; 增益

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1201002

Influences of He-Ne Gas Parameters on Light Intensity of Ring Laser Gyro

Xu Xiaoqing, Tan Zhongqi, Fan Zhenfang*, Zhang Bin, Zhao Hongchang

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In this study, the influence of the gas pressure ratio of helium to neon on the characteristics of a ring laser gyro is investigated. The relation between the power tuning curve and the gas pressure ratio in a ring laser cavity is theoretically derived from the plasma dispersion function. A specific type of a ring laser gyro is used for experimental measurements. An inflatable experimental device with strong operability, adjustable gas pressure ratio, and real-time monitoring of the gas parameters is presented. The relation between the output gain of the laser gyro and gas pressure ratio is determined. The optimal working gas pressure ratio of helium to neon is also determined. Experimental results indicate a positive relation between the laser output gain and gas pressure within a certain range. The output gain reaches its maximum at a certain pressure value and then falls with an increase of the pressure to the point, where the laser output becomes zero.

Key words lasers; ring laser gyro; power tuning curve; He-Ne gas parameters; gain

OCIS codes 140.3370; 140.3410; 140.3460

1 引 言

环形激光陀螺(RLG)是一种高精度的角度转动敏感器件,目前广泛应用于捷联惯导系统中^[1-3]。RLG本质上是一个环形气体激光器,其原理是基于Sagnac效应,把角度的转动转变为拍频信号输出^[4-6]。由于氦氖气体均匀性较好、折射率较小,其激光谱线的相干性、单色性等性能也较好,加上0.6328 μm 位置的谱线较为稳定^[7],因此工程应用中的RLG普遍使用氦氖气体作为增益介质,其中氖气是产生激光的物质,氦气是提高泵浦效率的辅助

气体。

氦氖气体参数是RLG在设计、存储、使用过程中非常重要的参数。为了保证获得更好的放电特性来满足原子的碰撞和跃迁要求,RLG中放电管的毛细管直径设计须符合一定的条件。实验发现氦氖气体的最佳气压气比与毛细管直径相互制约^[7],同时在RLG存储过程中,氦氖气体的压力、比例都会随着时间变化表现为表面对气体的吸附以及氦气向外渗漏,因此充气时应该考虑到氦气的渗漏而多充入一些氦气^[8]。另外,随着RLG内总气压的升高,还会出现增益饱和的现象,因此氦氖气体的气压气比

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-07-10; 录用日期: 2019-08-07

基金项目: 国防科技大学校预研项目(ZK16-03-02, ZK16-03-21)、湖南省科技计划项目(2016GK2002)

* E-mail: nudtfzj@126.com

参数还应保证 RLG 在使用过程中满足高性能工作的激光输出要求^[9]。

本文利用某型号的 RLG 设计了一组气压气比实验,采用向激光谐振腔内逐渐充入氦气来改变气体参数的方式,获得在各个气压气比下激光陀螺光强的扫模曲线,对数据进行处理后得到谐振腔内气压气比对输出光强的影响。得到的最优气压气比对工程应用具有一定指导意义。

2 激光陀螺的输出功率与增益曲线分析

激光陀螺本质上是一个环形谐振腔,因此气体压强会影响工作物质的增益系数,从而影响输出功率。由激光原理可知^[10],氦氖激光器的输出功率与充气压强 p 有关。若放电毛细管的直径为 d ,则存在一个使得输出功率最大的最佳 pd 值。压强的下降会使电子与原子间的碰撞减少,从而导致电子的平均动能上升,管内温度升高;毛细管直径减小,会加剧电子和离子的管壁复合,相同的粒子条件下只有加大电场强度才能维持放电电流的稳定,此时电子温度升高,输出功率增加。但两者不能过低,输出功率会因为氦氖原子数量减少而降低。氦氖气体的压强比也会影响输出功率。产生激光的 He、Ne 气体的压强比有一个合适的值。若该比值过小,输出功率较低;若是过大,Ne 的电离电位较低,其会因被电离过多而使得电子和 Ne 离子数目增加,在较低的电场下就能维持一定的放电电流,低电场强度导致的电子温度下降,从而使得激发速率下降,输出功率下降。

根据小信号单程净增益系数 α 、频率牵引效应和增益饱和效应,可以得到光强的准稳态解。在激光陀螺中,针对 Ne 原子在 $0.6328 \mu\text{m}$ 处的跃迁,在谱线的综合展宽中,均匀加宽和非均匀加宽的比值为 η ,常用的经验公式为^[11]

$$\eta = \nu_0 / ku = (57p + 10) / 1000, \quad (1)$$

式中: ν_0 为谱线的自然展宽和碰撞展宽之和,即均匀展宽的半峰全宽; ku 为多普勒线型下降到峰值点 $1/e$ 处的半宽度; p 为增益管内以 Torr 为单位的气体总气压, $1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$ 。为了避开在峰值增益附近的剧烈模竞争,采用等比例的双同位素²⁰Ne、²²Ne 的混合气体作为增益介质。双同位素的净增益系数由增益减去损耗得到^[11],即

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot g \cdot [Z_{\text{im}}(\xi + 0.44, \eta) + Z_{\text{im}}(\xi - 0.44, \eta)] - \gamma, \quad (2)$$

式中: g 为峰值增益的比值; γ 为单程损耗; ξ 为 Ne 原子频率参量; $Z_{\text{im}}(\xi, \eta)$ 为等离子色散函数 $Z(\xi, \eta)$ 的虚部。在双同位素增益管中,反向行波的光强差不会因为模竞争而增大,光强调谐曲线为^[11]

$$I_0 = \frac{\Gamma\alpha}{\beta + \Gamma\theta}, \quad (3)$$

式中:光强自饱和系数 β 和互饱和系数 θ 都由等离子色散函数表示; Γ 为辐射捕获修正量,其与气压有关。实验过程中 β 和 θ 都较小, $I_0(\xi, \eta)$ 曲线的趋势可以反映在 $\alpha(\xi, \eta)$ 上。

3 实验装置

为了探究气压气比对光强的影响,采用本课题组自制的激光陀螺进行测试,通过密闭玻璃管向增益管中充入确定比例的 He-Ne 气体,为了避免模式竞争,采用一定比例的²⁰Ne 和²²Ne 同位素。激光陀螺的基本结构如图 1 所示。

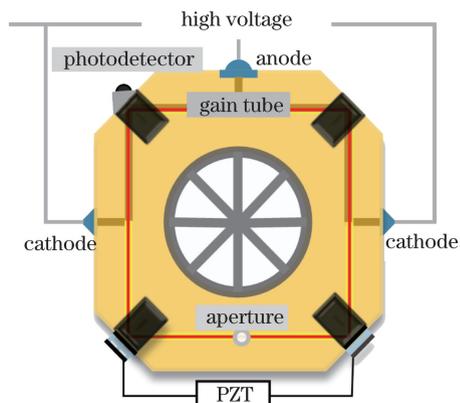


图 1 激光陀螺基本结构

Fig. 1 Basic structure of ring laser gyro

RLG 的核心是一个高度密封的腔体,零膨胀的微晶玻璃是其首选的制作材料^[12]。腔内由相互连通的毛细管、光阑等构成,外部有 4 个高反镜,3 个电极,电极由双阴极或双阳极构成。本实验选用双阴极激光陀螺。将外接电源连接到阳极和双阴极,高压放电点亮陀螺后,两极电压将稳定在三百多伏特。压电陶瓷(PZT)的工作原理是所施加的电场产生物理位移,在陀螺中具体表现为两个压电陶瓷同时作用,改变谐振腔的腔长,从而改变纵模间隔,在频率谱上实现模式的推移,从而实现扫模的功能^[13]。

气体实验所需的氦氖气体充气台结构如图 2 所示,其中储气罐与陀螺增益介质的充气孔相连,通过控制各阀门的开关实现定量充入氦同位素混合气体和氦气的功能,气压计可实时检测腔内气压大小,探

测精度为 10^{-3} Torr。真空泵的作用是保证储气罐的真空状态,其真空度在 5×10^{-7} Pa 以下。储气罐内 He、Ne 气体在常温状态下混合约 30 min 后能达到较好的混合效果。

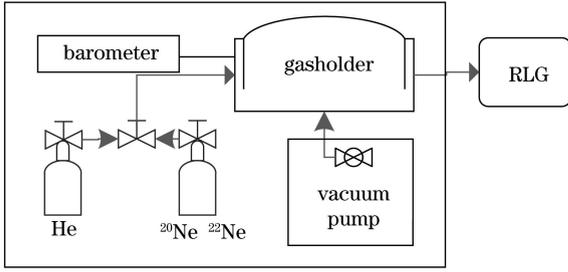


图 2 充气台结构图

Fig. 2 Structure of charging station

实验过程中往充气台内充入固定比例的 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne 同位素混合气体,增益气体中氖同位素的气压为定值 0.4 Torr,逐渐增加氦气的输入,每充入一定量氦气后,为保证气体的均匀性,需待两种气体混合均匀后再开始进行测量。

4 实验结果与分析

图 3 所示为调节压电陶瓷得到的光强扫模曲线,该扫模曲线反映的是光强随压电陶瓷驱动谐振腔的腔长的变化趋势。在这个曲线中重点关注峰值 A 和谷值 B。

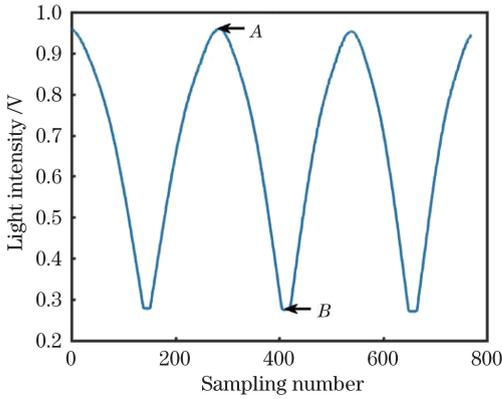


图 3 扫模曲线

Fig. 3 Mode-sweep curve

实验采用的激光陀螺具有较好的增损比,由于腔长较小,纵模间隔较大,因此出光带宽略小于相邻模间隔,且曲线的模斜很小,表明所用陀螺具有很好的稳定性^[13-14]。每一组气压气比的实验都对应一条扫模曲线。谷值 B 为一段无光区,表示当前条件下没有激光输出,探测器测得的光强为辉光强度,峰值 A 为辉光和激光的合光强,因此将峰值和谷值的光强相减,即可得到激光强度。取各个气压对应的各

条扫模曲线的峰值和谷值以及它们的差值,得到总光强、辉光强度和激光强度随气压气比的变化曲线,如图 4 所示。

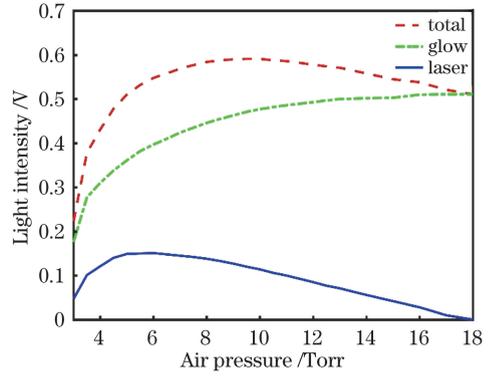


图 4 光强随气压的变化曲线

Fig. 4 Light intensity varying with gas pressure

图 4 中虚线表示辉光强度和激光强度的总和,随着氦气的不断充入,合光强曲线呈现先上升后下降的趋势,合光强在 8 Torr 气压处最大,此时的氦、氖气体的压强比为 19:1。图 4 中点划线表示辉光强度,随着气压和氦氖气体压强比的增加,辉光强度曲线呈非线性增加,气压过大时趋于平缓。由气体放电的知识可知,辉光是高压电离氦氖气体,即在激光器放电区中产生的沿各个方向发散的近似鲜红色霓虹光^[15]。辉光放电的机理复杂,其发光强弱与放电条件密切相关。在放电管中,气压 p 通过影响电子密度和电子温度来影响电离数,电离数与气压 p 成正比,但由于放电过程中时域具有非线性,辉光强度曲线呈非线性升高^[16]。在陀螺应用中常通过添加滤光片的方法来抑制辉光输出,在实验过程中发现,可以通过减小气压气比的方式来抑制辉光强度。图 4 中实线为辉光强度和激光强度的差值。激光强度曲线呈现先增大后减小的趋势,当总气压为 6 Torr 时激光的光强最大,总气压为 18 Torr 时不再有激光输出。实验中气压 p 的改变是通过增加氦气得到的,所以该曲线反映的不仅是气压的影响,还应综合考虑气体压强比的影响。

利用 Maple 数学软件对(2)式进行数值仿真,得到 $\alpha(\xi, \eta)$ 在不同 η 下的曲线,选取气压 p 为 5, 10, 15 Torr,由(1)式可得到 η 分别为 0.295, 0.580, 0.865,如图 5 所示。

气压 p 对 η 的影响是线性的,因此光强随 p 的变化反映在随 η 的变化上,从 $\alpha(\xi, \eta)$ 曲线可以看出,随着 η 的增大,工作在中心频率时,即频率偏移量为 0 时, α 逐渐减小。这个理论建立在氦氖气体

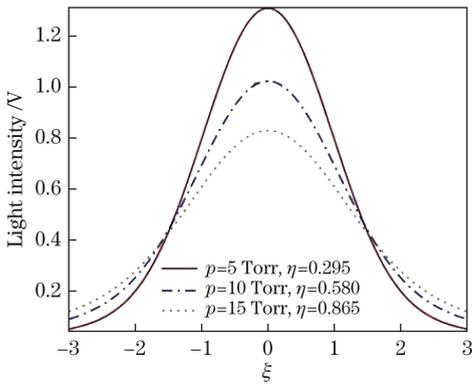


图 5 光强调谐曲线

Fig. 5 Frequency tuning curve of light intensity

分子配比适当,所有原子全部正常参与工作的理想情况,也就意味着随着气压的逐渐增大,单程净增益逐渐减小,因此光强调谐曲线位于中心频率时所得到的光强也逐渐减小,这也就是激光强度曲线在 6 Torr 气压之后呈现下降的原因。

实验中开始时谐振腔内辅助气体 He 的压强为 0,从微观层面上来说,激发 Ne 原子跃迁到上能级的方法是电子射束以及辅助气体 He。电子射束的轰击可以使 Ne 原子从基态跃迁到上能级激发态,但作用较弱,效率较低,主要的激发机构是电子轰击 He 原子跃迁到激发态,与基态的 Ne 原子发生碰撞,将 He 原子的能量转移到 Ne 原子,此时的转移效率很高。实验刚开始时由于 He 原子数量较少,共振转移无法正常进行,泵浦效率低。当 He 原子数量逐渐增多,直到 He 的气压达到 6 Torr 时,所有的原子都参与工作,共振转移以最大效率进行,此时的气压条件使得激光输出达到最大值,这也是激光曲线上升的原因。继续往腔内加入 He 气体,气压 p 逐渐增加,激光强度逐渐下降,符合理论上光强调谐曲线在中心频率处随气压的增加而逐渐下降的趋势。

从实验曲线可以看出,在 5~8 Torr 范围内,激光输出强度都处于较大值,此时气体压强比的范围是 12:1 到 20:1,在实际的工程应用过程中,该氦氖气体参数可以实现较好的激光输出。从理论得到的曲线可以看到,氦氖气体等比例升高时陀螺的输出增益随之减小,实验过程中气压逐渐增大,气压气比也逐渐增大,若是气比过大,Ne 的电离电位较低,其会因被电离过多而使电子和离子数目增加。因此不需要很高的电场就能维持一定强度的放电电流,而低电场会导致电子温度下降,从而使得激发速率下降,输出功率下降。

5 结 论

RLG 内气体是提供激光输出的关键因素,氦氖气体参数从各个方面影响激光陀螺的性能。本文探究了腔内气体参数对陀螺输出光强的影响,通过充气台设备改变陀螺内部的氦氖气体参数,得到陀螺在不同气压气比下的输出光强曲线。结果表明:最大光强输出点的气压为 8 Torr,最大激光功率输出点的气压为 6 Torr,综合考虑激光陀螺其他工作特性对气压的要求,选择 5~8 Torr 作为陀螺工作的区间,此时的气压气比为 12:1 到 20:1。当腔内气压为 18 Torr,气压气比接近 45:1 时,陀螺无激光输出,此时为失效点。各气压气比下得到的曲线可作为检测陀螺的依据,对工程应用有一定的指导意义。考虑到陀螺实际使用过程中,气压气比的设计需综合考虑毛细孔直径、工作电流等参数,才能一同构成最佳的工作状态,因此在设计激光陀螺过程中,应选取最优的气压气比,同时做好气体的防渗漏工作。

参 考 文 献

- [1] Macek W M, Davis D T M, Jr. Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers[J]. Applied Physics Letters, 1963, 2(3): 67-68.
- [2] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.
- [3] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- [4] Menegozzi L N, Lamb W E. Theory of a ring laser [J]. Physical Review A, 1973, 8(4): 2103-2125.
- [5] Wilkinson J R. Ring lasers[J]. Progress in Quantum Electronics, 1987, 11(1): 101-103.
- [6] Post E J. Sagnac effect [J]. Reviews of Modern Physics, 1967, 39(2): 475-493.
- [7] Gao B L, Li S T. The ring laser gyro [M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1984: 10-20.
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984: 10-20.
- [8] He J. Summarize of research on the ring laser gyro life[J]. Navigation and Control, 2018, 17(4): 56-60.
何婕. 某型激光陀螺寿命分析与改进[J]. 导航与控制, 2018, 17(4): 56-60.
- [9] He X Q, Zhang Z H, Gao A H, et al. Experimental investigation on the gain characteristics of laser gyro [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(3): 370-374.

- 何小庆, 张振辉, 高爱华, 等. 激光陀螺增益特性的实验研究[J]. 光子学报, 2011, 40(3): 370-374.
- [10] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, *et al.* Principles of laser[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 278-281.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 6版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 278-281.
- [11] Jiang Y N. 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.
- [12] Fan Z F, Lu G F, Zhang B, *et al.* Research on electrical characteristic of discharge tube in ring laser gyro[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0605002.
樊振方, 卢广锋, 张斌, 等. 环形激光陀螺放电管电学特性研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0605002.
- [13] Zhao X N, Han Z H, Yan J Z, *et al.* Analysis and improvement of mode slope ratio of RLG light intensity mode-scanning curve[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(4): 484-487.
赵小宁, 韩宗虎, 严吉中, 等. 激光陀螺光强扫描模曲线模斜机理分析与改善[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(4): 484-487.
- [14] Ma Y H, Lei J J, Xu H C, *et al.* Influence of gain-to-loss ratio on the performance of ring laser gyro[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1682-1685.
马仰华, 雷建军, 徐宏财, 等. 增损比对激光陀螺影响的研究[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1682-1685.
- [15] Wu S Y, Huang Y, Qu T L, *et al.* Optical method for He-Ne gas's discharge glow suppression in miniaturized ring laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8): 68-73.
吴素勇, 黄云, 曲天良, 等. 小型环形激光器中 He-Ne 气体放电辉光压制的光学方法[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 68-73.
- [16] Dai D, Zhang Y H, Ning W J. Influence of positive column dissipation characteristics on temporal nonlinear phenomena in atmospheric helium glow discharges[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1766-1774.
戴栋, 张雨晖, 宁文军. 大气压氦气辉光放电中正柱区消散特性对时域非线性行为的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1766-1774.