

文章编号:1001-5078(2024)11-1709-05

· 激光应用技术 ·

激光陀螺引燃技术研究及应用

刘婉妮

(西安欧亚学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:针对棱镜式激光陀螺引燃不可靠的现象,系统地研究了基于外置电极加载高频电场激励激光器件谐振腔的引燃方法,理论上分析了影响激光陀螺引燃电压的获取因素,在此基础上提出了两种增加谐振腔引燃可靠性的措施,通过缩短引燃阴极和引燃阳极之间的距离,有效降低了谐振腔所需的引燃电压值,从而使工作气体局部更容易被激发,进而产生雪崩效应,使整个内部空间的工作气体被激发,实现激光器件谐振腔的正常持续工作。实验结果表明,优化后的激光陀螺谐振腔在高、低、常各温度段可实现大于99.9%的可靠引燃。

关键词:棱镜式激光陀螺;引燃;谐振腔;电极

中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.009

Research and application of laser gyro ignition technology

LIU Wan-ni

(Institute of Information Engineering, Xi'an Eurasia University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of unreliability of prism laser gyro ignition, the ignition method of laser device resonator excitation based on external electrode loading high frequency electric field is systematically studied. The factors influencing the acquisition of laser gyro ignition voltage are theoretically analyzed. Based on this, two measures are proposed to increase the ignition reliability of the resonant cavity. By shortening the distance between the ignition cathode and the ignition anode, the required ignition voltage value of the resonant cavity is effectively reduced, making it easier for the working gas to be locally excited, and then produce an avalanche effect, so that the entire internal space of the working gas is excited, to achieve the normal continuous operation of the laser device resonator. The experimental results show that the optimized laser gyro resonator can achieve more than 99.9% reliable ignition at high, low and constant temperatures.

Keywords: prism laser gyro; ignition; resonant cavity; electrode

1 引言

激光陀螺是捷联式惯性导航系统的核心器件^[1],具有重量轻、启动时间短、功耗小、精度高等优点,在航天、航空、航海以及地面定位等领域发挥着重要作用^[2]。棱镜式激光陀螺^[3]是一种利用激光干涉原理测量角速度的高精度陀螺仪,它通过全

反射棱镜构成环形谐振腔,无反射镜背向散射,陀螺锁区小,且完全免镀膜,使得陀螺工作可以适应某些极端环境条件^[4]。棱镜式激光陀螺主要以环形激光器作为核心元件,按光腔形状可分为三角形陀螺和四边形陀螺,其中三角形激光陀螺光路数量少,腔内反射镜损耗小;而四边形激光陀螺包围面积大,灵

基金项目:陕西省科技计划项目(No. 2024JC-YBMS-542)资助。

作者简介:刘婉妮(1981-),女,硕士,副教授,主要研究方向为信号与信息系统处理。E-mail:liuwanni@eurasia.edu

收稿日期:2024-04-24;**修订日期:**2024-07-04

敏度更高。

本文以某型号的四边形激光陀螺为研究对象,该环形激光器用膨胀系数低的微晶玻璃经高精度光学加工而成作为腔体^[5],通过四个反射棱镜将工作气体封装在谐振腔光路通道中,其中,两块反射镜为平面镜,另两块反射镜为凹面镜。为了保持窄频带、低功耗、高稳定工作,激光器一般采用氦气和氖气作为激光产生的能量源,氖气为工作气体,氦是提高氖的泵浦效率的辅助气体。激光器谐振腔采用外置电极的方式通过高频电场激励工作气体,当高压直流电源加在激光工作物质上时,氦气分子会被电离,形成等离子体。此时,氦气分子起到了传递能量的作用。同时,当高压脉冲电源加在激光工作物质上时,氖气分子会被激发,产生高能态的氖原子。这些高能态的氖原子与氦气分子发生碰撞,使氦气分子也达到高能态。当这些高能态的氦气分子回到基态时,会释放出光子。这些光子在光学谐振腔内来回反射,不断得到增强,最终形成一束高度单色、相干的光——即激光。氦氖激光器主要的波长是 632.8 nm,该波长的光在可见光谱中呈红色^[3]。由于氦氖气体激光器光束具有较好的方向性、单色性和很高的频率稳定性,光束质量好以及能长时间稳定且连续工作,是目前高精度陀螺产品的首选激光器^[6]。

激光陀螺工作时依靠高压实现氦氖混合气体击穿电离,在高频电场之间持续放电,产生激光泵浦实现陀螺正常工作^[7]。激光陀螺的使用领域均要求引燃装置必须稳定、可靠地引燃激光器,以保证陀螺仪的连续工作和准确测量。同时,引燃装置还需要考虑到能效问题,尽量减少能量的损失,提高激光陀螺的整体效率^[8]。通常激光陀螺谐振腔可以实现正常启辉和工作,但据调研,各科研单位在实际应用中都遇到过激光陀螺谐振腔不易引燃或引燃不稳定的问题,严重影响了激光陀螺工作的可靠性。本文以某型号棱镜式激光陀螺为研究对象,从该激光陀螺的引燃机理出发,通过实际应用及理论分析陀螺谐振腔引燃不可靠的产生原因,并提出改进措施,最终通过改进措施实现激光器件谐振腔的正常工作,有效解决了陀螺谐振腔不易引燃的问题,提高了该型号激光陀螺工作的可靠性。

2 引燃机理分析

引燃装置是棱镜式激光陀螺谐振腔中的一个关

键组成部分^[9],它的主要功能是引燃激光陀螺仪内部的混合气体,从而产生单色激光,为激光陀螺的测量工作提供光源^[10]。如图 1 为棱镜式激光陀螺谐振腔引燃电路及持续工作电路示意图所示,引燃装置通常由高频电源构成,用于提供激发混合气体所需的能量^[11]。当电源被激活时,它会向装有混合气体的管子输送电流,使气体中的原子或分子吸收能量后跃迁到高能级,然后再回到低能级并释放出光子,从而产生激光。当打开仪表时,工作电路通过外置的两个电极给氦氖激光器谐振腔工作通道加载持续的高频电场,并通过引燃电路为谐振腔工作气体提供一个瞬间高电压脉冲即引燃电压(其电压值可达到 3.0~6.0 kV),直接将谐振腔中的工作气体激发产生辉光^[12],由于谐振腔工作通道处于外置电极加载的持续高频电场中,工作通道中的工作气体也在瞬时被激发并持续产生激光,即谐振腔被引燃。

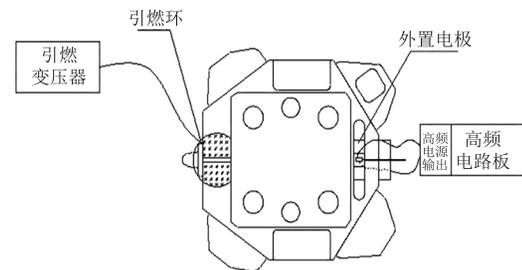


图 1 谐振腔引燃电路及持续工作电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resonant cavity ignition circuit and continuous operation circuit

2.1 氦-氖激光器放电特性

氦氖气体激光器的放电属于辉光放电,其放电过程是一个动态的、随时间变化的过程,其中电压的变化是关键因素,影响着放电的稳定性和激光输出的特性。氦-氖环形激光器放电特性如图 2 所示。

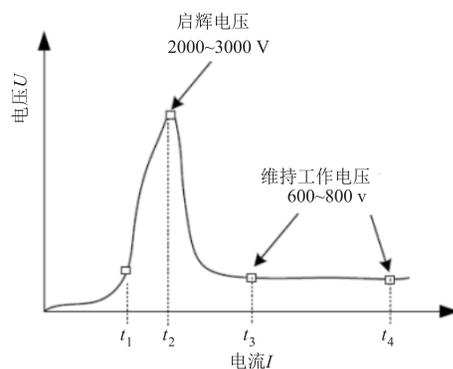


图 2 氦氖激光器放电特性

Fig. 2 Discharge characteristics of helium neon laser

(1) 放电的起始阶段($t_1 \sim t_2$): 该区间是放电的准备阶段, 氦-氖气体导电率很低, 处于暗放电区, 无辉光产生。

(2) 放电的激活期($t_2 \sim t_3$): 随着电压增达到起辉点电压范围(2000 ~ 3000 V), 此时氦-氖气体被激发, 电子开始获得足够的能量与气体分子发生非弹性碰撞, 致使电子跃迁和光子放出, 从而引发电弧放电。

(3) 放电的稳定期($t_3 \sim t_5$): 电压 U 开始下降并维持在一个较低的水平, 此时激光器内部的电子和气体分子维持了一个稳定的相互作用状态, 产生持续的激光输出。这个阶段对应的电压范围是维持工作电压(600 ~ 800 V), 这个电压水平足以维持氦-氖气体稳定放电。

在气体放电过程中, 从非自持放电向自持放电过程时所需的极间电压称为引燃电压, 或点火电压。在实际应用中上述这种引燃谐振腔的方法存在着一定的不可靠性, 甚至难引燃或不可引燃的情况。由于引燃变压器提供的引燃电压直接作用在引燃环上^[6], 相当于谐振腔的引燃阴极, 而距引燃环 30 mm 外的吸气剂支架相当于引燃阳极, 引燃阴阳极不参与激光器持续工作, 只在引燃瞬间起作用。那么每个谐振腔所需的引燃电压究竟与什么参数有关呢?

2.2 引燃电压的影响因素

根据著名的帕邢定律, 以平行平板谐振腔放电为例, 在气体成分、电极材料和气体温度不变的条件下, 气体击穿电压表示为下式:

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln Aph - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \quad (1)$$

式中, A 、 B 为由气体种类所确定的经验常量; p 为气体压强; d 为两电极之间的距离; γ 为阴极处的二次电子发射系数, 是描述物质表面电子发射能力的物理量, 它反映了在一定条件下, 单位时间内从物质表面发射出的电子数量。

由 V_b 表达式知, 决定谐振腔引燃电压的因素有次级电子发射系数 γ 、压强 p 、阴、阳极之间的距离 d 、以及 A 、 B 的取值, 下面就以上因素分别予以分析。

(1) 电极材料和表面状况。

当参数 p 、 d 及 A 、 B 一定时, 则只有二次电子发射系数 γ 影响引燃电压, 而影响 γ 的因素主要有阴极材料的种类和阴极的表面结构, 在实验中所用产

品的阴极材料为高纯铅, 由于其纯度较高, 表面杂质和缺陷较少, 因此可具有较高的电子发射性能。所以影响 V_b 的因素就只有阴极的表面结构了, 而实际生产中的阴极是通过钎焊焊接而成, 其表面形状是不可控的, 表面粗糙度增加则可能导致其二次电子发射系数降低, 致使引燃电压 V_b 也不同, 这是造成谐振腔引燃不可靠的主要成因。

因此, 通过控制阴极表面结构, 如减少表面吸附的气体或改变表面平整度, 可以有效地调整和优化二次电子发射系数, 以满足特定应用的需求。然而钎焊工艺无法有效控制阴极形状及表面状况, 使得想通过缩小二次发射系数 γ 确保谐振腔引燃可靠从工程实践方面很难实现。

(2) 气体压强和电极距离。

对引燃电压求导并令导数为零, 即: $\frac{dV_b}{d(pd)} = 0$, 可得引燃电压 V_b 、 pd 的最小值为:

$$(V_b)_{\min} = \frac{B}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2)$$

$$(pd)_{\min} = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{A} \quad (3)$$

由公式(1)、(3)可知, 启辉电压 V_b 与气体压强 p 和电极距离 d 的乘积基本呈线性关系, 且对于放电过程而言, pd 存在一个最小临界值。这意味着压强和电极距离共同决定了启辉所需的电压。从理论分析来看, 气压提高或降低压强, 会改变启辉电压, 但也会影响放电的稳定性, 而我们所研究的棱镜式激光陀螺所选定的气体压强是经过长期大量实验数据积累而确定的重要参数, 从工程实践考虑, 改变气压的研究难度和工作量都极大。

通过上述分析, 想要在不影响激光陀螺安全性、长寿命及其他特性的前提下获得稳定的低引燃电压 V_b , 只能通过缩短引燃阴极与引燃阳极之间的距离 d 来寻求解决途径。

3 辅助引燃实验

基于以上理论分析, 本文设计了一系列实验, 通过实验发现, 在谐振腔引燃阴极和引燃阳极之间增加一个金属片, 能够帮助谐振腔更容易起弧和形成辉光, 从而使工作气体局部更容易被激发, 进而产生雪崩效应, 使整个内部空间的工作气体被激发, 从而达到帮助谐振腔引燃的目的。且金属片距离引燃环

越近越有助引燃,当距离小于5 mm后可达到100%引燃的效果。同时在实验过程中还发现,当工作气体中增加的金属片与引燃环接触时则失去了作用,无法起到有助谐振腔引燃的目的。

通过上述实验现象并结合理论分析,促使谐振腔引燃的并不是金属片本身,而是该金属片起到了引燃阳极的做用,并有效缩短了引燃阳极于引燃阴极之间的距离,降低了谐振腔所需的引燃电压 V_b ,使得谐振腔更易被引燃。而如果该金属片与引燃环接触,则两者的电势相等,不能起到引燃阳极的作用,也就无法有效降低谐振腔所需的引燃电压 V_b 了。

基于上述分析,进行了6个谐振腔的试验,在每个谐振腔工作气体距离引燃环内部4~5 mm处设置一个金属片,通过测出引燃谐振腔所需具体引燃电压值来验证谐振腔引燃可靠性及理论分析的正确性,并和未加金属片的谐振腔引燃时所需的引燃电压值进行比较,结果如表1、表2所示。

表1 加金属片谐振腔各温度段所需引燃电压值

Tab.1 The required ignition voltage values for each temperature range of the metal plate resonant cavity

加金属片谐振腔编号	引燃电压/kV		
	低温(-40℃)	常温(25℃)	高温(70℃)
001	2.28	2.30	2.28
002	2.06	2.06	2.06
003	2.49	2.34	2.34
004	2.31	2.28	2.27
005	2.38	2.32	2.36
006	2.28	2.28	2.28

表2 未加金属片谐振腔各温度段所需引燃电压值

Tab.2 The required ignition voltage values for each temperature range of the resonant cavity without metal plates added

未加金属片谐振腔编号	引燃电压/kV		
	低温(-40℃)	常温(25℃)	高温(70℃)
91065	5.34	3.53	2.81
72032	4.72	3.70	2.96
102525	4.55	3.72	3.24
111524	4.93	3.68	2.76

从表1和表2数据中可以得知当缩短谐振腔引

燃阴、阳极之间的距离为4~5 mm时,引燃谐振腔所需引燃电压值将比不加金属片有大幅度下降,并且所需的引燃电压值由环境温度变化带来的影响也不明显,稳定性明显高于未加金属片的谐振腔。从这6个试验谐振腔直观的引燃效果看,这些谐振腔均能在不同温度段可靠引燃,一次引燃成功率高达100%,从而提高了激光陀螺整体的可靠性。

4 实际应用

根据上述试验及分析的结论,我们先后设计了两种实现理论中提出的缩短谐振腔引燃阴、阳极之间距离的方案。

第一种方案,钎焊排气管时在谐振腔的 $\phi 3$ 孔口用钎焊的方法焊接一个壁厚0.1 mm,外直径2.9 mm,长5 mm的镍管,要求与引燃环保持1 mm以上的距离。镍管具有良好的导电性和导热性,能够快速有效地将电能转化为热能,从而引燃工作气体。同时,由于钎焊工艺的使用,使得引燃装置与工作气体之间的连接更加紧密,减少了能量损失。通过大量实验,该方法无复杂的操作过程,安装方便,在投产的50个谐振腔中有46个引燃特性可靠,高、低、常温引燃情况均一致。其余4个谐振腔出现了引燃环与镍管焊接处连接,即焊接的镍管成为了引燃阴极的一部分,未起到引燃阳极的作用,所以这4个谐振腔的引燃情况和未加镍管的谐振腔基本一致,极为不可靠,同时也受到温度变化的影响。

基于以上原因,我们设计了第二种方案完善了第一种方案的弊端,将吸气剂支架设置于谐振腔的内腔中,在支架的底部,安装有吸气剂,用来吸附并排除谐振腔内的残余气体,从而提高激光陀螺的性能和稳定性以及寿命。此外,从吸气剂支架上引出一条细长的金属片,通过储气孔中的 $\phi 3$ 孔伸向引燃环处,距离引燃环2~3 mm,赋予了吸气剂支架另一种功能,即帮助谐振腔引燃,通过该方法生产的50个谐振腔在高、低、常各温度段均为100%可靠引燃。这种吸气剂支架的结构设计简洁,加工容易,不需要复杂的焊接过程,因此可以大大提高加工和装配的质量。不仅提高了气体激光陀螺引燃的可靠性和效率,也减少了吸气剂药片在大气中的暴露时间,进一步提高了其在谐振腔内壁的安装可靠性,减少了装配和焊接所带来的灰尘污染。

5 结论

本文主要针对棱镜式激光陀螺谐振腔不易引燃

的现象,在对引燃机理分析的基础上,通过实验验证了缩短引燃阴、阳极之间距离能够降低了陀螺谐振腔的引燃电压,有效解决了某型号激光陀螺谐振腔的引燃问题。并提出两种引燃辅助装置,在谐振腔引燃中所起到的效果明显,从根本上解决了该型激光陀螺谐振腔引燃不可靠的现状。文中所依据的方法和结论对依靠外置电极加载持续高频电场的气体激光器件的引燃设计提供了参考。

参考文献:

- [1] Zhang Hongbo, Guo Yanlong, Li Linjun, et al. Research on laser gyroscope assisted illumination technology [J]. Optics and Optoelectronics Technology, 2023, 21 (3): 79 - 86. (in Chinese)
张红波,郭岩龙,李林军,等. 激光陀螺辅助启辉技术研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21 (3): 79 - 86.
- [2] Huang Yueruihan, Ma Jiajun, Zhang Zipeng et al. Scale factor compensation technology for total reflection prism laser gyroscope [J]. Applied Optics, 2023, 44 (2): 444 - 449. (in Chinese)
黄月锐涵,马家君,张子鹏等. 全反射棱镜式激光陀螺标度因数补偿技术[J]. 应用光学, 2023, 44 (2): 444 - 449.
- [3] Li Haotian, Pan Ziwen, Liu Wenyao, et al. Optimization design of digital frequency locking accuracy for resonant optical gyroscopes [J]. Microelectronics and Nanoelectronics, 2018, 55 (12): 890 - 894, 916. (in Chinese)
李昊天,潘梓文,刘文耀等. 谐振式光学陀螺数字锁频精度优化设计[J]. 微纳电子术, 2018, 55 (12): 890 - 894, 916.
- [4] Cui Juan, Ma Jiajun, Hu Jenny. Zero bias compensation method for prismatic laser gyroscopes [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering. 2022, 43 (6): 176 - 181. (in Chinese)
崔娟,马家君,胡珍妮. 棱镜式激光陀螺零偏补偿方法[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (6): 176 - 181.
- [5] Liu Wannan, Duan Yonghong, Jia Huixia. Simulation and research on laser frequency stabilization control system based on Matlab [J]. Automation and Instrumentation, 2021, (5): 149 - 152. (in Chinese)
刘婉妮,段永红,贾惠霞. 基于 Matlab 的激光器稳频控制系统仿真与研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, (5): 149 - 152.
- [6] Cao Jianwei. Design of temperature compensation system for laser gyroscope based on ARMCortex-M4 [D]. Xi'an: Northwestern University, 2021. (in Chinese)
曹建伟,基于 ARMCortex-M4 的激光陀螺温度补偿系统设计[D]. 西安:西北大学, 2021.
- [7] Liu Jianning, Liu Yujie, Jiao Mingxing, et al. Research on laser gyroscope intensity tuned linetype based on lamb theory [J]. Journal of Optics, 2020, 40 (21): 105 - 112. (in Chinese)
刘健宁,刘玉洁,焦明星,等. 基于 Lamb 理论的激光陀螺光强调谐线型研究[J]. 光学学报, 2020, 40 (21): 105 - 112.
- [8] Liu Wannan. Development of a visual experimental teaching platform for the "signal and system" course based on MATLAB [J]. Application of Microcomputers, 2023, 39 (7): 78 - 80, 84. (in Chinese)
刘婉妮. 基于 MATLAB 的“信号与系统”课程的可视化实验教学平台开发[J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (7): 78 - 80, 84.
- [9] Liu Jianning, Bian Xiaoyun, Weng Jun, et al. Temperature segmented frequency stabilization control technology based on prism laser gyroscope [J]. China Laser, 2020, 47 (6): 176 - 181. (in Chinese)
刘健宁,卞肖云,翁浚,等. 基于棱镜式激光陀螺的分温度段稳频控制技术[J]. 中国激光, 2020, 47 (6): 176 - 181.
- [10] Tao Yuanbo, Li Sihai, Lu Zheng. Study on the mode jumping characteristics of a prism laser gyroscope [J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2019, 37 (1): 122 - 128. (in Chinese)
陶渊博,李四海,鲁政. 一种棱镜式激光陀螺跳模特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37 (1): 122 - 128.
- [11] Ren Lina. Research on optical non coplanar detection technology of prism laser gyroscope resonator [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)
任莉娜. 棱镜式激光陀螺谐振腔光学非共面检测技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [12] Liu Jianning, Jiang Junbiao, Ma Jiajun, et al. Loss control of prismatic laser gyroscopes based on cavity tuning technology [J]. China Laser 2018, 45 (4): 54 - 61. (in Chinese)
刘健宁,蒋军彪,马家君,等. 基于调腔技术的棱镜式激光陀螺损耗控制[J]. 中国激光, 2018, 45 (4): 54 - 61.