

微晶玻璃腔体一体化兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器(I): 结构与工艺

张 斌 龙兴武 刘贱平 赵洪常 刘 军

(国防科学技术大学光电学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要 介绍了利用兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的基本结构与腔长调节工作方式, 从激光器结构方面对影响其预热时间、频率稳定性和频率重复性的主要因素进行了深入探讨。介绍改进设计的新型微晶玻璃腔体一体化兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的基本结构、制作工艺与优势。该激光器腔体采用极低膨胀系数的微晶玻璃材料, 反射镜采用石英镜片光胶连接, 无应力超高真空钢封形式, 谐振腔稳定性好。利用该激光器进行了实验, 实验结果表明, 该激光器工作中不需要预热, 环境适应能力极强, 在高低温与冲击振动条件下均能稳定工作, 频率稳定度可以达到 10^{-10} 量级。

关键词 激光器; 激光光学; 频率稳定性; 兰姆凹陷; 微晶玻璃

中图分类号 TN248.2+1; TM935.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0814005

Lamb-Dip Frequency-Stabilized He-Ne Laser With an Integrated Cavity Made of Zerodur (I): Structure and Techniques

Zhang Bin Long Xingwu Liu Jianping Zhao Hongchang Liu Jun

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The basic structure of traditional Lamb-dip stabilized He-Ne laser and its cavity length controlling manner are introduced. The influence of the laser's structure on its warm-up time, frequency stability and reproducibility is discussed in detail. The basic structure and techniques of a novel-type integrated Lamb-dip stabilized He-Ne laser are presented, whose cavity with very low coefficient of expansion is made of zerodur. There are noticeable techniques applied in the laser, including the quartz reflective mirrors' optical contact and the super high vacuum indium seal, that ensure the cavity's steady operation and its frequency high stability. The experimental result shows that the laser is able to operate well without warm-up time, even though in the condition of either high-low temperature or shocking environment, whose relative frequency stability can reach the order of magnitude of 10^{-10} .

Key words lasers; laser optics; frequency stability; Lamb-dip; zerodur

OCIS codes 140.1340; 140.3460; 140.7300

1 引 言

在计量学领域, 频率稳定的 633 nm He-Ne 激光光源作为波长标准在干涉测量系统中一直扮演着十分重要的角色。形成这种状况的原因主要有两个: 首先, 633 nm 激光波长是国际计量局(BIPM)推荐的复现米定义的若干标准谱线中的一条^[1,2], 对于干涉测量系统的波长标准而言, 便于量值的统一;

其次, 经过多年的研究, 频率稳定的 633 nm He-Ne 激光技术相对成熟, 在实际应用中积累有大量经验可供借鉴^[2~7]。事实上, 在众多商品化的激光干涉仪中, 所用的标准光源绝大多数是 633 nm He-Ne 激光器。最近二十多年以来, 随着半导体激光器制造技术的发展, 人们注意到了半导体激光器的一些优点, 并且尝试着将其用于各种干涉测量系统中。

收稿日期: 2011-01-14; 收到修改稿日期: 2011-04-02

作者简介: 张 斌(1970—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事激光陀螺与新型激光器方面的研究。

E-mail: kd208zb@sina.com

但是,实践证明,在可以预见到的将来,半导体激光器由于其特性上存在的固有缺陷,在精密干涉测量领域中仍然无法取代 He-Ne 激光光源的位置。因此,继续发展和完善以传统技术为基础的频率稳定 He-Ne 激光光源仍然是今后计量领域的一项重要任务^[8,9]。

在各种利用不同方法实现频率稳定的 He-Ne 激光系统中,兰姆凹陷稳频激光器是一种开发时间最早、影响面广、实用性很强的稳频激光系统。这种激光器多年前就已经作为高准确度的激光光源用于诸如量块测量激光干涉仪、线纹标准激光干涉比较仪、激光硬度计等重要的标准测量设备中,在激光应用领域的重要性并没有因为时间久远而有所减退。然而,普通的兰姆凹陷稳频激光器由于结构上的复杂性,使得它在抗干扰能力指标上不如基于其他稳频原理的全内腔结构激光器,在实际应用中存在一定的局限性。针对此问题,本文在激光器传统结构的基础上,对兰姆凹陷稳频激光器的结构组成进行了工艺和技术改进,极大地增强了激光器的稳定性和抗外界环境扰动能力。

2 传统结构兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器

2.1 基本结构

兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器除了最普通的同轴全内腔形式以外,常用的另一种结构形式如图 1 所示^[10]。

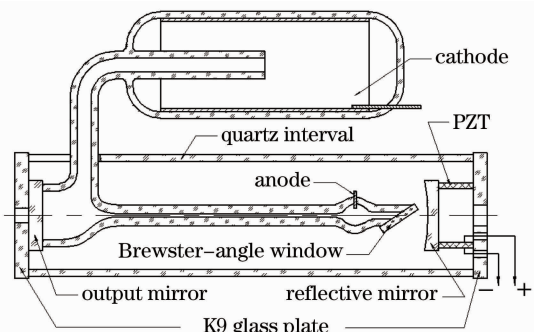


图 1 传统结构兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器示意图
Fig. 1 Structure of traditional Lamb-dip stabilized He-Ne laser

激光器主体部分采用普通灯工玻璃烧制,采用旁轴管状结构既可以减少阴极温升对谐振腔长度的影响,也可以避免阴极可能出现的轻微溅射污染激光器镜片。激光器的平面输出镜与布儒斯特窗片一般采用低熔点玻璃或环氧树脂胶封接,平面镜粘接

在 K9 玻璃板上与石英玻璃管间隔器相连。全反镜曲率半径一般为 0.5 m 或 1 m,用环氧树脂胶粘接于压电陶瓷环(PZT)上,压电陶瓷环粘接在另一块 K9 玻璃板上与石英间隔器相连。这样,通过调 PZT 的驱动电压可以调节激光器腔长来实现器稳频控制。

2.2 主要缺点分析

2.2.1 谐振腔稳定性不够

虽然激光器采用了热膨胀系数较小的石英管作为谐振腔间隔材料,但由于压电陶瓷的线膨胀系数较大,激光器内、外部的温度变化都会导致 PZT 长度发生改变而影响激光器的腔长,进一步影响其工作频率。同时,为了保证激光器的腔长调节能力,PZT 的长度一般比较长(10 mm 左右),由于 PZT 材料的不均匀性与尺寸、装配误差的影响,PZT 稳频过程中的伸缩运动可能会导致全反镜的偏轴歪扭,产生激光谐振腔的失谐扰动。

激光器的毛细管通常采用壁厚约 3 mm 的细长玻璃管,毛细管的放电温升形变会导致谐振腔光轴与毛细管轴线的相对偏差而影响激光器的增益。同时,毛细管的挠变还会改变激光器衍射损耗的大小。这两种因素都会导致激光器的净增益发生改变,从而影响其功率稳定性。

2.2.2 高压、大电流、高功耗工作模式

激光器通过控制毛细管的直径(一般为 0.9 mm 左右)来实现基横模振荡,细长毛细管结构直接提升了激光器的起辉电压和维持电压,且最佳工作电流较大(一般为 4 mA 左右),这种高压、大电流的工作模式直接导致激光器的功耗较大、发热严重,影响其频率稳定性与功率稳定性。

2.2.3 存在腔内杂气影响

激光器的内表面积很大,在制作时由于清洗或除气不够彻底容易在工作中释放少量杂气,一方面导致其输出功率下降,更严重的是会对兰姆凹陷的线型与位置产生影响,最终影响其频率稳定度与复现性。虽然激光器工作中的放电抽运效应可以将微量杂气集中抽运到阴极附近,从而使其增益区气体保持纯净,但这需要一定的抽运时间,其长短视其杂气含量而定。

上述三种因素都是导致传统结构激光器在使用过程中需要经过一段较长的预热时间才能维持稳定工作的根本原因。

2.2.4 工程应用缺陷

激光器采用旁轴式管状外形虽然可以减小阴极

热效应对谐振腔的影响,但使用安装不方便,激光管的扭曲形变容易导致其功率下降、不出光甚至间隔器玻壳炸裂,而且激光器的抗压、抗震能力不强,在一些特殊的高低温条件下无法正常工作,环境适应能力较差。

3 新型兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的基本结构

针对提到的各种影响激光器稳频性能指标的因素,新设计了微晶玻璃兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的基本结构如图 2 所示,实物照片见图 3。

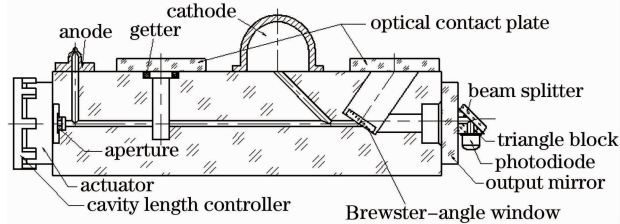


图 2 微晶玻璃兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的基本结构

Fig. 2 Structure of Lamb-dip stabilized He-Ne laser made of zerodur

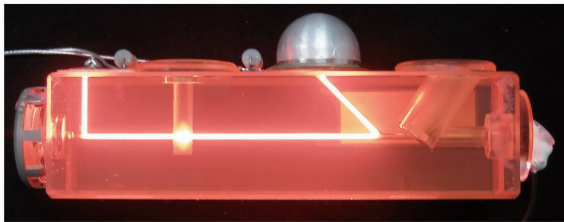


图 3 微晶玻璃兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的实物照片

Fig. 3 Photograph of Lamb-dip stabilized He-Ne laser made of zerodur

激光器腔体在一块外形尺寸为 $120\text{ mm} \times 32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 的微晶玻璃上一体化加工而成,其毛细管直径为 1.6 mm ,增益长度等于 72 mm ,充气压力为 360 Pa ,氦氖气压比为 $7:1$,在 2 mA 工作电流下的稳频输出光功率等于 0.34 mW 。

空心无氧铜抽气阳极既是激光器的工作电极,也是激光器的抽真空、充气管道,其阴极采用半球状高纯铝外置结构,阳极与阴极均采用钢封方式实现超高真空密封。布儒斯特窗片使用尺寸为 $\phi 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的零级石英片,同样采用钢封方式封接。全反镜采用石英开槽平面片与腔体光胶连接,在压电陶瓷调节机构的作用下实现激光器的腔长调节。输出镜采用曲率半径为 2 m 的石英球面片与腔体光胶连接,镜片透射率为 0.5% 。根据一般稳定球面腔的相关公式计算可得,该激光器高斯光束的腰斑半

径为 0.31 mm ,因此选取其内置光阑直径为 1.1 mm 以确保基横模振荡。激光器输出镜上通过三角块固联了一片 K9 玻璃分光镜和一个光电管,用以提取激光器稳频控制所需的光强信号。

4 新型激光器的优势

与传统结构的激光器相比,新型激光器具有以下几个明显的优点。

1) 腔长恒定,温度特性好

传统结构激光器的谐振腔间隔器大多采用石英玻璃管,其线膨胀系数 $\alpha = 6 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$,新型激光器的腔体材料采用极低膨胀微晶玻璃,其线膨胀系数 $\alpha \leq 2 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$,两反射镜均采用石英镜片与腔体光胶连接,谐振腔长度完全由微晶玻璃腔体长度来决定,因此工作中无需预热,开机即可达到标称稳频指标,在固定环境温度条件的全工作过程中压电陶瓷不会出现跳模现象。

2) 谐振腔稳定性高,耐温度冲击能力强

激光器的腔长控制全反镜采用如图 4 所示的石英开槽平面片,特殊设计的抓卡状压电陶瓷调节机构粘接在镜片外缘,两片环状压电陶瓷可以实现腔长调节电压与小抖动稳频电压的独立施加。由于石英槽片的槽底厚度很薄,其电压调节灵敏度比筒状压电陶瓷结构高 $2 \sim 3$ 倍,相邻两纵模对应的压电陶瓷调节电压为 70 V 左右。

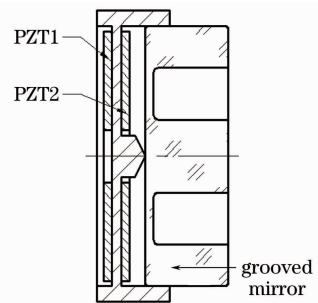


图 4 激光器的腔长调节机构

Fig. 4 Structure of laser cavity length controller

激光器所用槽片的加工精度极高,槽底厚度一致性很好,而且作用点位于槽片中心柱的正中心,当改变压电陶瓷的驱动电压,槽片中心柱沿谐振腔轴线平移的过程中导致的光路歪扭一般小于 $0.05''$,比筒状压电陶瓷结构要小 $1 \sim 2$ 个数量级,提高了激光器谐振光路的稳定性。测量结果表明,在不采取任何预热措施的情况下,激光器室温长时间工作的输出功率稳定度优于 2.5% ,即使在 $-50\text{ }^\circ\text{C} \sim +100\text{ }^\circ\text{C}$ 的宽范围、快速变温情况下,激光器仍然能够稳定工作。

3) 无应力超高真空密封

由于激光器电极与腔体材料的膨胀系数差异很大,激光器采用了特殊的钢封技术。电极与腔体封接面经过精密抛光、清洗后,利用特殊处理的高纯钢进行封接。钢是一种低熔点(156 ℃)、低硬度、延展性好以及活性极强的金属材料,对于表面光亮的多种金属和玻璃的洁净表面都有很强的浸润作用,很容易扩散到玻璃和金属的内部而达到超高真空密封的目的(封接区泄漏率小于 $5 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)。同时,由于钢自身的延展性能非常好,即使固联部件的膨胀系数差异非常大,封接区也不会产生应力,在多轮高低温循环冲击(-55 ℃~120 ℃)的情况下也很少出现漏气现象,真空密封可靠性高。另外,钢的饱和蒸汽压极低,采用钢封方式不会对激光器产生任何污染。

4) 无应力布儒斯特窗片封接

激光器的布儒斯特窗片采用低吸收损耗的零级石英窗片,考虑到石英与微晶玻璃的膨胀系数细微差异,窗片同样采用钢封方式与腔体封接,可以完全消除窗片的封接应力,在同等条件下可以保证激光偏振度并提高激光器的输出功率。

5) 低电压、小电流、低功耗工作模式

激光器的毛细管直接在微晶玻璃腔体上加工而成,毛细管不会因为气体放电的温度影响而产生形变。同时,由于激光器的毛细管比较粗,其起辉电压(4.4 kV)和管压降(840 V)都很低,激光器可以在1.5~2 mA的工作电流状态下维持稳定放电,激光器功耗低、热效应不明显,有利于改善其频率稳定性与功率稳定性。

6) 等效旁轴式结构,散热良好

根据放电毛细管的走向,该激光器也相当于旁轴式结构,外置式的空心裸阴极散热性能好,可以进一步减少阴极热效应对谐振腔的影响。虽然阴极的电子发射表面积很小,但激光器的低电流工作模式和阴极的特殊加工与处理措施可以保证阴极在长期的使用过程中不会出现溅射现象。

7) 极强的外部环境适应能力

高稳定性、高强度的集成一体化设计可以满足极端高低温与强冲击振动条件下的应用需要,而且激光器布儒斯特窗片与输出镜之间的空间与外界完全隔离,外部粉尘、环境的湿度变化与气流扰动都不会对激光谐振腔产生任何影响。

8) 高纯度的内部气体环境

传统结构激光器的内部气体容积很大,微量杂

气不会对激光器的正常工作产生致命影响,但新型激光器的内部气体容积很小,虽然减小激光器内表面积的设计和独特的处理工艺大大降低激光器在存储与使用过程中的杂气释放总量,但充分考虑到激光器对工作气体纯度的要求,在其内部安装了专门的高效能吸气剂。该吸气剂与氦氖等惰性气体没有任何反应,对于其他的非惰性气体具有很强的吸附能力,可以确保激光器内部正常的工作气体环境,维持激光器净增益曲线与兰姆凹陷稳频参考点的稳定,有利于改善其频率稳定度与频率复现性。

5 结 论

对于兰姆凹陷稳频这类以工作物质净增益曲线的自身特征参数作为稳频参考点的激光器而言,由于激光器的净增益取决于激光介质的抽运增益与激光器总损耗的差值,各种影响抽运增益(工作电流、杂气等)和损耗(谐振腔的失谐扰动、衍射损耗的变化等)的因素都会影响激光器的稳频参考基准,降低激光器的频率稳定度与频率复现性指标。正是由于这些因素(甚至包括激光器的内应力)的共同影响,导致传统结构的兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器在工作中需要经历一段较长的预热时间,必须等到激光器达到热平衡的稳定状态才能获得其标称稳频指标,这在一定的程度上限制了它的应用。因此,激光器从结构上尽可能消除各种误差因素的影响特别是保持其谐振腔的稳定性,从而维持激光器净增益曲线自身的稳定是提高稳频激光器性能指标的重要途径。

传统结构的兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器存在着多种影响腔长稳定性和净增益曲线稳定性的因素,而微晶玻璃兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器的所有部件(包括稳频信号提取部分)都集成在一块微晶玻璃腔体上,在结构上具有体积小、功耗低、热稳定性好等诸多优势,激光器的输出功率稳定度高,具有极强的环境适应能力(包括冲击振动、温度、湿度、环境洁净度等),在高低温连续快速变温的情况下均能稳定工作,而且工作中不需要预热时间,开机即可输出频率稳定的激光。

为了测量该激光器的稳频性能指标,新型激光器在中国计量科学研究院量子部长度处与标准碘饱和吸收稳频 He-Ne 激光进行了多次拍频测量。测量结果表明,该激光器 1 s 取样的相对阿伦方差为 $(8.4 \sim 11) \times 10^{-11}$,1000 s 取样的相对阿伦方差为 $(8.3 \sim 17) \times 10^{-10}$,其频率复现性为 1.3×10^{-8} 。

参 考 文 献

- 1 T. J. Quinn. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards[J]. *Metrologia*, 2001, **40**(3): 103~133
- 2 T. M. Niebauer, James E. Faller, H. M. Godwin *et al.*. Frequency stability measurements on polarization-stabilized He-Ne lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(7): 1285~1289
- 3 N. Umeda, M. Tsukiji, H. Takasaki. Stabilized 3He-20Ne transverse Zeeman laser[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(3): 442~450
- 4 Jean-Marie Chartier, Jacques Labot, Glenn Sasagawa *et al.*. A portable iodine stabilized He-Ne laser and its use in an absolute gravimeter[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1993, **42**(2): 420~422
- 5 H. Sasada, O. Kubota. Frequency of Lamb-dip-stabilized 1.52 He-Ne lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 1992, **55**(2): 186~188
- 6 J. L. Hall. Frequency-stabilized lasers from the beginning toward the future[J]. *Laser Physics*, 1994, **4**(2): 306~318
- 7 Qian Jin, Shi Chunying, An Jianuan *et al.*. A novel 633 nm He-Ne Lamb-dip frequency stabilized laser[C]. Proceedings National Academic Conference of Metrology, 1998. 338~342
钱 进,石春英,安家鸾等. 新型 633 nm He-Ne 兰姆凹陷稳频激光系统[C]. 全国计量测试学术大会论文集, 1998. 338~342
- 8 Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202
王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1198~1202
- 9 Wang Chu, Shen Bohong, Wu Yifang *et al.*. Longitudinal Zeeman beat frequency curve and principle and experiment for frequency stabilization of a 633 nm He-Ne laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(9): 808~813
王 楚, 沈伯弘, 吴义芳等. 633 nm 氦氖激光的纵向塞曼拍频曲线及稳频的原理和实验[J]. 光学学报, 1984, **4**(9): 808~813
- 10 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 252~262
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 252~262