

一种内腔式 He-Ne 激光器频率稳定方法的实验研究

钱进[†] 刘忠有 石春英 刘秀英 王建波 殷聪 蔡山

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

(2012年4月10日收到; 2012年8月6日收到修改稿)

实现了用微型风扇冷却的方法替代常见的加热方式完成对 He-Ne 内腔激光器的频率稳定. 研究了微型风扇驱动电压与转速的响应特性和内腔式 He-Ne 激光器的热膨胀特性. 采用风冷方式对激光器的腔长进行调节和控制, 并通过双纵模功率平衡原理完成了激光频率的稳定. 稳定后的激光器管壁平均温度低于 50 °C. 与高精度碘稳定激光的拍频实验结果表明, 其频率在 20 h 内的波动范围小于 1.4 MHz ($\tau = 1$ s), 4 个月内激光频率的相对标准不确定度为 $U = 4.7 \times 10^{-9}$.

关键词: 内腔式 He-Ne 激光, 风冷, 双纵模功率平衡, 激光器管壁温度

PACS: 06.20.-f, 06.20.Ft, 42.60.Lh, 42.60.-V

DOI: 10.7498/aps.62.010601

1 引言

频率稳定的 He-Ne 激光作为波长标准已经被广泛地应用于长度计量和激光光谱学等领域. 其中由内腔式 He-Ne 激光器构成的稳定光源, 因其所独有的结构简单、性能稳定等优点, 更是被用于各种以科学研究为目的的高精度激光干涉测量系统中^[1-4]. 这类光源的工作原理有一个共性, 就是借助 Ne 原子跃迁谱线的稳定性, 利用激光增益谱线中频率与功率的关系, 将频率控制转换为光强控制, 实现稳定激光频率的目的.

1972 年, Balhorn 等^[5] 基于内腔式 He-Ne 激光器相邻纵模偏振方向相互垂直的特点, 首次提出了双纵模功率平衡稳频原理并实现了激光频率的稳定, 使稳定激光频率的相对变化量小于 1×10^{-7} . 1988 年, Niebauer 等^[6] 利用同一原理开发的激光器, 将这个结果减小了一个量级.

众所周知, 激光频率的稳定是通过腔长的控制实现的. 由于内腔式 He-Ne 激光器的腔镜直接封装在激光管的两端, 腔长的调节等效于激光管长度的调节. 调节方法依据不同的原理分为两类: 一类是改变激光器的温度, 利用材料的热胀冷缩效应; 一类是利用外力, 比如通过压电陶瓷或类似器件使激

光器产生机械形变. 两相比较, 利用激光器温度的改变来调节腔长要容易得多. 在文献 [1, 2] 中, 前者利用激光电源的电流改变量对激光器管壁温度进行调节, 后者通过加热膜的电流改变量对激光器管壁温度进行调节. 二者都是通过激光器温度的改变, 实现对腔长的主动控制. 然而, 额外升高的温度不但会改变激光器原有的特性, 使稳频系统的调整变得更加困难, 而且对激光器的使用寿命也会造成不利影响. 1980 年 Umeda 等^[7] 以及 1982 年 Sasaki 和 Hayashi^[8] 曾分别发表了用风扇调节激光器温度来稳定激光频率的结果. 然而, 此方法未见后续报道. 时至今日, 利用电炉丝或加热膜对激光器管壁加热, 并通过温度补偿来调节激光频率的方法已经成为全内腔激光稳频技术中普遍使用的方法. 无论是在双纵模稳频原理的激光系统中, 还是在塞曼分裂或其他原理稳频的激光系统中, 都能找到实际应用的例子^[9-11].

由于加热方式不可避免地会引入激光器的额外温升, 这对于延长激光器的使用寿命和克服激光器的腔变形问题都是极为不利的. 针对这些问题, 本文探讨了用风冷方式替代加热方式稳定激光的方法, 并在双纵模功率平衡原理的 633 nm 稳频激光系统中实验验证了它的可行性.

[†] 通讯作者. E-mail: qianjin@nim.ac.cn

2 原理结构及激光管的热膨胀特性

稳频系统选取双纵模激光管作为控制对象. 激光管腔长 $L = 140 \text{ mm}$, 相应纵模间隔 $\Delta\nu = 1070 \text{ MHz}$. 原理和组成与文献 [1] 相似: 从激光管背向输出端输出的激光束, 包含两个频率的振荡模式, 被沃拉斯顿棱镜依照特定的偏振方向一分为二, 各自入射到二象限光电二极管的不同探测面上, 以得到对应光强的差值, 并以此为误差信号控制激光频率.

激光管、沃拉斯顿棱镜和二象限光电二极管被固定在一个壁厚为 1.5 mm , 截面积为 $33 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$, 长度为 250 mm 的铝筒内. 筒的上表面 (激光管背向输出端附近) 装有风扇, 并开有风扇的通气孔. 通气孔的直径为 30 mm , 筒的一端 (激光器前向输出端) 敞开, 二者形成对流通道. 整个铝筒被安装在一个 $82 \text{ mm} \times 69 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的铝外壳内. 铝筒的下表面装有温度传感器和帕尔贴器件. 帕尔贴器件的散热面与铝外壳的底板相连, 藉此可实现铝筒与外壳底板的热交换及温度的测量和控制. 为了在激光管周围形成一个相对稳定的温度环境, 铝筒的平均温度被主动控制, 处于恒定状态, 以保障系统工作的可靠性.

在预热过程中, 处于自由状态的激光器因放电电流的加热作用, 管壁温度会逐渐上升. 假定管壁的加热过程只导致激光谐振腔沿光轴方向伸长, 而不会使激光管产生弯曲变形, 则激光腔内的双纵模振荡模式会沿着增益线型单方向移动. 当一个纵模经过线型中心时, 另一纵模在低频侧 (红侧) 消失, 同时高频侧 (蓝侧) 产生新的纵模, 此时的激光器处于换模点附近, 两纵模光强一个达到最大, 一个达到最小, 光强差出现最大或最小值. 当两纵模位于线型两侧对称于线型中心位置时, 其光强相等, 光强差为零. 双纵模以激光的半波长 $\lambda/2$ 为周期, 随激光腔长变化, 此消彼长, 循环往复. 腔长每增加 $\lambda/2$, 光强差就通过零点一次. 两次过零点之间的时间间隔取决于激光管的膨胀速率, 二者之间成反比关系.

图 1 中的实验结果是在环境温度为 $T = (23 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 激光器放电电流 $I = 4.5 \text{ mA}$ 的条件下得到的. 接通电源后, 在放电电流、帕尔贴器件和控温系统的共同作用下, 铝筒的平均温度在 4 min 内被恒定到 $(27 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, 其过程如图 1 (a) 所示. 铝筒温度的恒定不仅可以隔绝外界温度变化

的影响, 而且加速了激光器管壁温度的平衡进程. 图 1 (b) 为 50 min 内双纵模的光强差随时间变化的实验结果, 它反映了腔长变化的规律. 以时间点 38 min 为标志, 此前, 激光管的温度从 23°C 开始不断升高, 激光腔长随之伸长, 呈现单方向变化; 此后, 激光器的温度基本达到平衡, 激光腔长不再单方向变化. 其间, 双纵模的光强差变化了 31 个周期, 对应激光器腔长的增量 $\Delta L = 633 \text{ nm} \times 31$. 考虑到激光管玻璃的线膨胀系数 $\alpha = 4.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 激光管长度 $L = 140 \text{ mm}$ 以及初始温度为 23°C 等条件, 可以估算出在自由状态下达到热平衡时, 激光器管壁的平均温度 $T = 53.5^\circ\text{C}$.

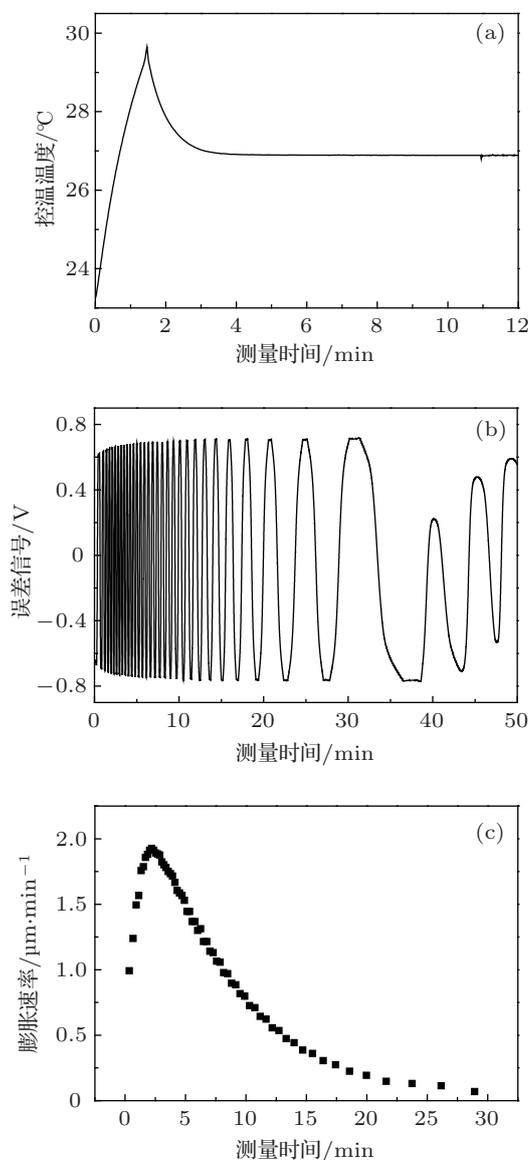


图 1 在激光器自由运转状态下得到的部分测量结果 (a) 铝筒的温度控温过程; (b) 作为误差信号的双纵模光强差随时间的变化规律; (c) 由 (b) 得到的不同时间激光腔长的膨胀速率

根据图 1 (b) 中前 30 min 内不同时刻过零点的

时间间隔, 经过简单计算, 得出与之相应的腔长膨胀速率随时间的变化曲线如图 1(c) 所示. 由此可知, 激光腔长的膨胀速率在接通电源的开始阶段急剧上升, 在 2.5 min 时达到最大值 $v = 1900 \text{ nm/min}$, 随后逐渐降低, 直至趋近于零. 这个结果表明, 在预热过程中, 不同时段的热膨胀速度不同, 激光腔长的改变量也不同. 系统闭锁时, 这个改变量将成为闭环增益的一部分. 过快或过慢的腔长膨胀速率都会给控制造成困难. 选择合适的预热时间有利于激光腔长的调整和控制. 图 1(c) 可为这种选择提供很好的参考.

3 风扇转速与预热时间

如引言中所述, 激光频率稳定的实质是激光腔长的稳定, 对于内腔式 He-Ne 激光器而言, 就是管壁温度的稳定.

固定在铝筒内的激光管处于半封闭状态. 激光管工作时, 由于放电电流的作用, 使得铝筒内部的空气温度始终高于铝筒外部空气的温度. 利用铝筒内外之间的气流通道, 通过风扇的转动就可以强制铝筒内外的空气按照一定的方向和流速循环, 完成冷热空气的交换, 从而实现激光管壁温度的稳定.

频率稳定系统采用普通的微型冷却风扇作为调节激光管温度的执行元件. 风扇尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 驱动电压的标称值范围是 (9.5—13.8) VDC, 功耗为 0.84 W, 平均转速 5500 r/min . 一般情况下, 这种风扇全速转动时所产生的机械振动和过高的空气流量不利于激光频率的稳定, 因为激光管对其周围的气流变化和机械振动非常敏感. 要取得好的稳频效果, 风扇的转速须尽量低且平稳. 为了考察风扇转速与驱动电压之间的对应关系, 我们在 0 V 到 12 V 的范围内, 对风扇转速进行了测量实验. 实验结果如图 2 所示.

结果显示, 驱动风扇的阈值电压为 3 V, 在 0—3 V 之间, 风扇处于停止状态; 在 3—12 V 之间, 转速随驱动电压的增高而增大, 转速从 900 r/min 增加到 5500 r/min . 二者之间近似为线性关系. 通过合理选择驱动电压, 可以获得平稳、缓慢的转速, 在实现激光管壁温度的调控的同时, 最大限度地减小机械振动对激光器的影响.

频率稳定系统以双纵模的光强差作为误差信号. 在图 1(b) 中的上升沿和下降沿的每一个点都可以作为锁定点, 本文选择上升沿的过零点作为锁

点.

考虑到风扇的机械惯性和激光器管壁温度变化速率等因素都可能造成腔长调节的时间延迟, 驱动风扇的调整电路主要以比例和微分为主. 因此, 通过零点的误差信号由 PID 电路 (比例、微分、积分控制电路) 处理后, 变为具有特定频率和宽度的电压脉冲序列. 由于这个脉冲序列的等效直流电压较低, 用它驱动风扇不仅可以有效降低风扇转速, 而且可以在低转速下保持转速的平稳. 脉冲序列的频率和宽度因预热时间、锁定点和 PID 参数的选择而不同, 因此, 驱动风扇的等效直流电压和风扇的转速也不同. 图 3 展示了由实验得到的在锁定点和 PID 参数一定, 激光器预热时间分别选取 7, 9, 11 和 13 min 时, 系统闭环后驱动风扇的转速. 图 3 中的结果显示, 当选择激光器预热时间为 11 min 时, 风扇的平均转速最低且最平稳, 是一个理想的锁定点.

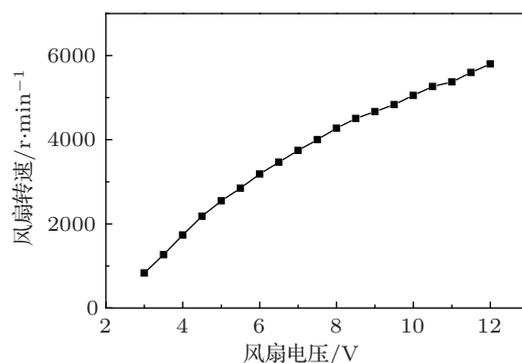


图2 风扇的直流电压驱动实验

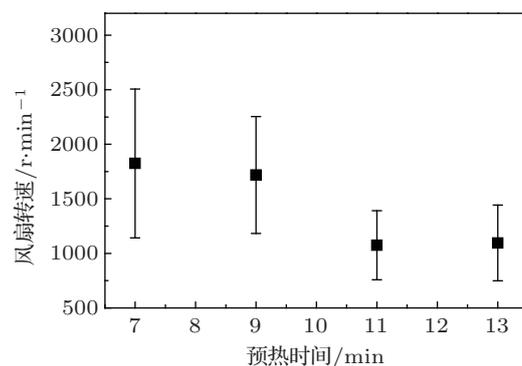


图3 不同预热时间条件下, 锁定激光频率后驱动风扇的转速

4 激光频率稳定度实验

在激光器的预热过程中, 激光频率的漂移量取决于因材料的热膨胀效应所产生的腔长的变化量.

当某一时刻激光腔长从自由状态进入到锁定状态时,此时激光腔长的变化趋势将成为稳频系统闭环增益的一部分,直接影响到激光频率稳定的效果.

当选择激光器预热时间为 11 min 左右时,由图 1 (c) 不难看出,此时激光器的膨胀速率 $v = 0.643 \mu\text{m}/\text{min}$,即 $v \approx 2 \times \lambda/2/\text{min}$. 实际工作中,预热时间是以激光器特定的膨胀速率 $v \approx 2 \times \lambda/2/\text{min}$ 为依据确定的.

当激光器管壁的初始温度为 23°C 时,以误差信号描述的激光器预热和锁定的过程如图 4 所示. 根据与第 2 节中同样的估算方法,锁定后的激光器管壁的平均温度 $T = 46.6^\circ\text{C}$.

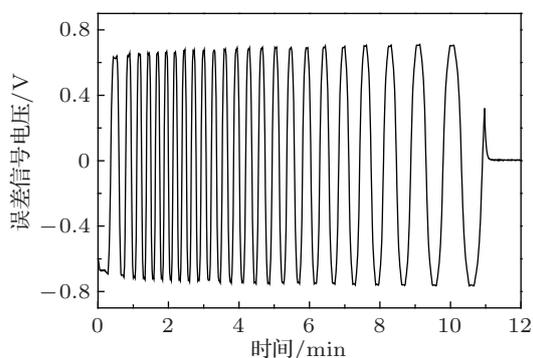


图 4 激光器预热和锁定过程实验

一般情况下,根据图 4 中锁定前后误差信号的变化幅度可以对频率波动的范围进行估测. 但是,估测结果容易受到诸多因素的影响,不能完全反映实际结果. 本系统的测量结果是通过拍频测量实验得到的.

实验中,以 633 nm 碘稳定 He-Ne 激光作为参考激光,参考激光的频率被锁定在碘分子超精细结构的 d 分量上,频率值 $f = 473612379.828 \text{ MHz}$,相对标准不确定度 $u = 2 \times 10^{-11}$ [12],将双纵模激光中位于谱线蓝侧的纵模分量作为被测激光. 通过拍频实验不仅可以考察单次测量过程中被测激光频率的波动范围和阿伦方差,而且可以确定被测激光的绝对频率值.

图 5 展示了一个采样时间 $\tau = 1 \text{ s}$,测量周期为 20 h 的拍频测量的实验结果. 其间,实验室处于无空调和封闭状态,环境温度从锁定前的 23°C 下降到 20°C . 被测激光的平均频率值 f_0 与参考频率 f 之差 $f_0 - f = 378.3 \text{ MHz}$,平均频率的波动范围是 $\pm 0.7 \text{ MHz}$.

图 6 所示是 20 h 内,取样时间 $1 \text{ s} \leq \tau \leq 10000 \text{ s}$ 被测激光频率的阿伦方差. 其中, $\tau = 10000 \text{ s}$ 对应的阿伦方差为 6×10^{-11} ,说明稳定激光系统具备很好

的长期控制能力和很强的抗干扰的能力.

为了考察稳定激光频率值的不确定度指标,在 4 个月时间里用同样的方法进行了重复性测量实验. 每次实验从激光器的预热开始,测量时间大于 3 h,共进行了 30 次. 测量结果如图 7 所示. 结果显示,被测激光的平均频率比参考频率高 378.94 MHz,其中频率的最大值和最小值分别为 381.15 MHz 和 376.70 MHz,二者之差为 4.45 MHz (如图 7 中虚线所示). 由此得到 4 个月内激光频率的平均值 $f_0 = (473612758.77 \pm 2.23) \text{ MHz}$,相对标准不确定度为 $U = 4.7 \times 10^{-9}$.

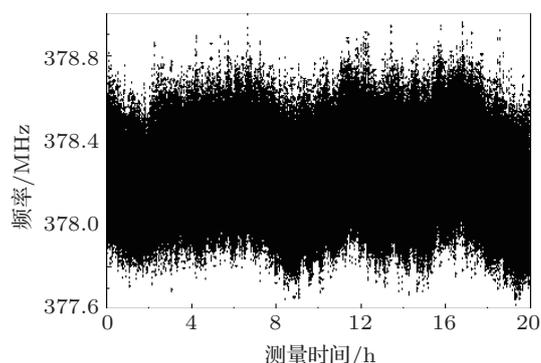


图 5 稳定状态下激光频率的漂移曲线

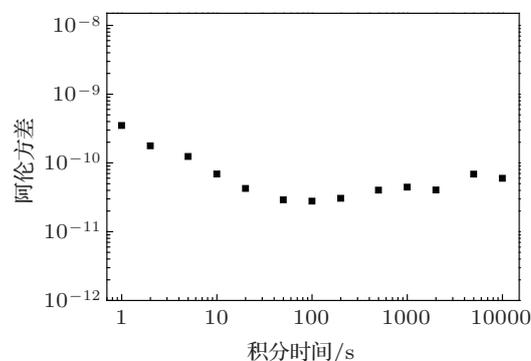


图 6 稳定状态下激光频率的阿伦方差

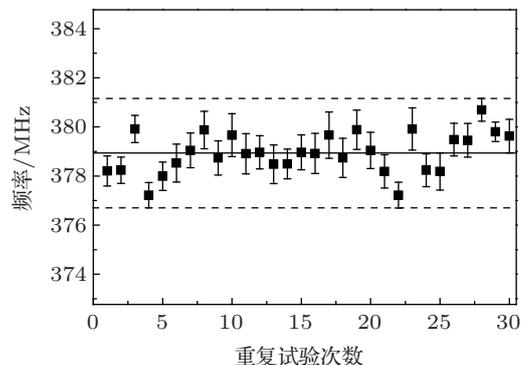


图 7 稳定状态下激光频率重复性实验结果

5 结论

通过研究内腔式 He-Ne 激光器预热过程中的腔长漂移特性和微型风扇的驱动电压与转速的响应特性, 利用微型冷却风扇代替热膜调节内腔式 He-Ne 激光器腔长的方法, 并将这种方法用于双纵模稳频原理, 实现了 633 nm He-Ne 激光器的频率稳定, 使得激光器管壁的平均温度只有 46.6 °C, 而在传统的加热方式中激光器管壁的平均温度接近

70 °C^[13], 二者的温度差 > 20 °C. 这意味着采用风冷的方法实现激光频率的稳定不仅可以有效地避免因激光管过热所产生的腔变形问题, 而且对于延长激光器的工作寿命也是有益的.

与碘稳定激光的拍频结果显示, 风冷式双纵模稳定激光器连续 20 h 工作的频率波动范围 < 1.4 MHz ($\tau = 1$ s), 阿伦方差达到 10^{-11} 量级 ($\tau \geq 10$ s), 4 个月内频率的相对标准不确定度 $U = 4.7 \times 10^{-9}$.

-
- [1] Bobroff N 1993 *Meas. Sci. Technol.* **4** 907
- [2] Lawall J 2004 *Opt. Photon. News* **15** 40
- [3] Parks H V, Faller J E, Robertson D S 2001 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **50** 598
- [4] Lawall J 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 2786
- [5] Balhorn R, Kunzmann H, Lebowsky F 1972 *Appl. Opt.* **11** 742
- [6] Niebauer T M, Faller J E, Godwin H M, Hall J L, Barger R L 1988 *Appl. Opt.* **27** 1285
- [7] Umeda N, Tsukiji M, Takasaki H 1980 *Appl. Opt.* **19** 442
- [8] Sasaki A, Hayashi T 1982 *Jpn. J. Appl. Phys.* **21** 1455
- [9] Pan C L, Jean P Y 1986 *Appl. Opt.* **25** 2126
- [10] Fellman T, Jungner P, Stahlberg B 1987 *Appl. Opt.* **26** 2705
- [11] Eom T, Choi H, Lee S 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 221
- [12] Qian J, Liu X Y, Shi C Y, Liu Z Y, Tan H P, Cai S, Chan T K, Lan Y-P, Ishikawa J, Dahlan A M, Howick E, Louise M, Tonmuanwai A 2007 *Metrologia* **44** 04005
- [13] Ciddor P E, Duffy R M 1983 *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16** 1223

Experimental study on frequency stabilization method of internal-mirror He-Ne laser

Qian Jin[†] Liu Zhong-You Shi Chun-Ying Liu Xiu-Ying Wang Jian-Bo
Yin Cong Cai Shan

(Division of Metrology in Length and Precision Engineering, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 10 April 2012; revised manuscript received 6 August 2012)

Abstract

Frequency of an internal-mirror He-Ne laser is stabilized by using a micro cooling fan, instead of traditional heating method. Both the relationship between driving voltage and rotating speed and the thermal expansion of the internal-mirror laser are discussed. The cavity length of the laser is controlled and adjusted by air cooling. The frequency stabilization is based on a theory of power balance between two longitudinal modes. The average temperature of the laser tube is less than 50 °C when the frequency is stabilized. A frequency fluctuation of less than 1.4 MHz in 20 h and a frequency relative standard uncertainty of $U = 4.7 \times 10^{-9}$ in 4 months are evaluated by measuring the beat signal with a high-precision laser stabilized by iodine.

Keywords: internal-mirror He-Ne laser, air cooling, power balance of two longitudinal modes, temperature of laser tube

PACS: 06.20.-f, 06.20.Ft, 42.60.Lh, 42.60.-V

DOI: 10.7498/aps.62.010601

[†] Corresponding author. E-mail: qianjin@nim.ac.cn