

# 红外波段双线 He-Ne 激光的频率稳定

邓罗根

(北京理工大学光学工程系, 100081)

**提要:** 本文介绍了用于绝对距离干涉计量的  $3.39\ \mu\text{m}$  波段双线 He-Ne 激光的稳频工作的背景、要求和所采用的方法, 分析了稳频伺服环路, 说明了稳定性实验的理论依据并给出了实验结果。

**关键词:** 激光稳频, 绝对距离干涉计量

## Frequency stabilization of infrared dual-line He-Ne laser

Deng Luogen

(Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing)

**Abstract:** Frequency stabilization of  $3.39\ \mu\text{m}$  band dual-line He-Ne laser for absolute distance interferometry was achieved successfully. This paper presents the background, requirements and the method of frequency stabilization of this laser, analyses the stabilization servo-loop, explains the principle of stability experiments and gives relevant experimental results.

**Key words:** laser stabilization, absolute distance interferometry

### 一、引言

用于大长度绝对测量的拍波干涉仪是近年来出现的新型干涉仪, 它所使用的光源一般是双波长的。这种双波长可以由塞曼分裂得到, 也可以由双波长激光器提供(如已被采用的 He-Xe 双波长激光器<sup>[1]</sup>,  $\lambda_1 = 3.37\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 3.51\ \mu\text{m}$ )。拍波干涉仪不仅象传统的测长仪一样要求激光的频率和功率稳定, 而且还要求双波长光强相等。因为只有保证双波长光强相等, 才能得到准确的拍波, 进而实现大长度的拍波干涉测量, 所以光强一致性是拍波干涉仪对光源提出的特殊要求。

$3.39\ \mu\text{m}$  双线 He-Ne 激光器是为了解决大长度测量问题而研制的, 它同时发射  $\lambda_1 = 3.3922\ \mu\text{m}$  ( $3s_2 \rightarrow 3p_4$ ) 和  $\lambda_2 = 3.3912\ \mu\text{m}$  ( $3s_2 \rightarrow 3p_2$ ) 两条谱线, 其拍波合成波长  $\lambda_s = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| \approx 11.5\ \text{mm}$ 。在合理设计腔长的条件下, 腔模与两谱线增益曲线在频率轴上的分布会出现图 1(a)、(b) 所示的两种等光强状态。微调腔长可得到图 2 所示的功率调谐曲线, 图中 A、B 是两个可用于稳频的等光强工作点。在这两个点上的波长  $\lambda_{1A}$  和  $\lambda_{1B}$ 、 $\lambda_{2A}$  和  $\lambda_{2B}$  稍有差异, 对应的合成波长相近但不相等 ( $\lambda_{SA} \approx \lambda_{SB}$ )。利用  $\lambda_{SA}$  和  $\lambda_{SB}$  的差异性, 组合成更长的合成波长, 借助拍波干涉仪, 可实现被测长度由粗测到精测的逐级精化<sup>[2]</sup>。因此,  $3.39\ \mu\text{m}$  波段双线 He-Ne 激

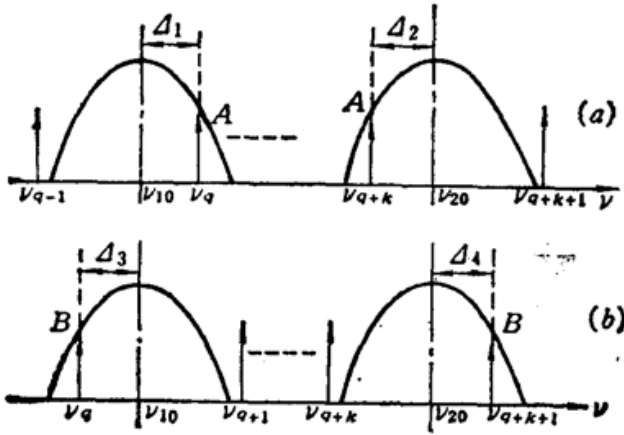


Fig. 1 Distribution of cavity modes and gain curves on frequency axis under the circumstances of equal intensity

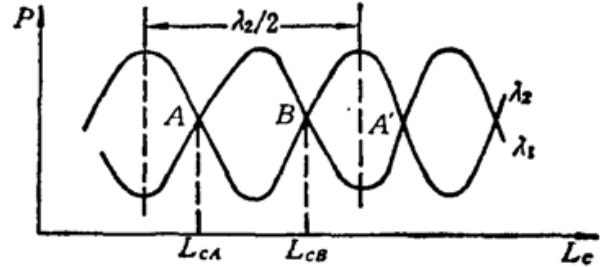


Fig. 2 Power versus cavity-length tuning characteristic (desired)

光的稳频工作除了考虑频率和功率稳定、双谱线光强一致外,还要考虑工作点 A、B 的互换,以保证两级合成波测长方案的实现。

用甲烷饱和吸收稳频虽然稳定度高、复现性好,但结构庞大、复杂,不易测量现场使用,同时甲烷吸收对 3.3912 μm 和 3.3922 μm 两谱线的竞争有极大影响,不利于双谱线等光强输出。本文利用拍波干涉仪指示激光等光强状态,结合甲烷吸收方法实现双谱线光强信号的分离,以 3.3912 μm 和 3.3922 μm 双线竞争作为稳频判据,从双谱线功率-腔长调谐曲线这一实验基础出发,通过反馈回路把激光双线频率稳定在等光强工作上(A 或 B, 见图 1 和图 2),频率稳定度优于 4.5 × 10<sup>-8</sup>。

### 二、3.3912 μm、3.3922 μm 双谱线光强信号的分离方法

3.39 μm 波段双线 He-Ne 激光输出的双波长间隔约为 1nm,用传统的棱镜、光栅等方法均难以分开间隔这样小的两条谱线,同时由于两条谱线的偏振状态相同,也难以利用偏振特性

进行分光。利用具有适当长度、充有合适气压的甲烷吸收盒可以完全吸收 λ<sub>1</sub> = 3.3922 μm 谱线,分离出 λ<sub>2</sub> = 3.3912 μm 谱线,但是在光电转换后,如果简单地从 λ<sub>1</sub> + λ<sub>2</sub> 的总信号中减去 λ<sub>2</sub> 的分信号,由于两路信号通道的增益不同,相减所得的信号并不能反映 λ<sub>1</sub> 线的强度变化。因此,为了能得到反映 λ<sub>1</sub> 强度变化的分信号,有必要寻找一种调节两路信号通道增益一致的方法。作者在博士论文工作期间,提出并实现了利用拍波干涉仪监视零点(等光强状态)的双谱线光强信号分离方法。

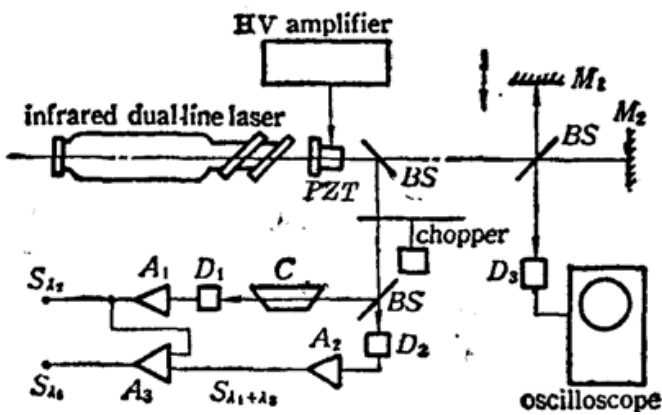


Fig. 3 Signal separation of dual-line intensity

实验原理如图 3 所示。图中 C 是长度为 40 mm、气压等于 35 Torr、能完全吸收 λ<sub>1</sub> 线的甲烷吸收盒。A<sub>1</sub> 是固定增益放大器, A<sub>2</sub> 是可调增益放大器。A<sub>3</sub> 是单位增益差动放大器,它

完成信号  $S_{\lambda_1+\lambda_2}$  和信号  $S_{\lambda_1}$  的相减任务。为了实现双谱线光强信号的分离, 首先微调腔长, 使激光器工作在等光强状态, 然后调节  $A_2$ , 使信号  $S_{\lambda_1} - S_{\lambda_2} = 0$ 。激光器的工作状态通过拍波干涉仪观察。在不等光强的情况下, 虽然干涉信号随着参考镜  $M_1$  的扫描出现幅度的涨落, 但没有拍波零点。当双谱线光强一致时, 参考镜每移动半个合成波长  $\lambda_s/2$ , 拍波零点重复出现一次。据此可判断双谱线光强的一致性。

### 三、3.39 $\mu\text{m}$ 波段双线氦-氖激光稳频环路的组成与分析

稳频环路的框图如图 4 所示, 图中各方块首尾相接构成一闭合环路(伺服环), 各部分的作用为:

1. 信号获得部分: 从斩波器到整流滤波器输出是双波长光强信号的获得部分。斩波器把直流光辐射转变为交流光辐射, 以便消除器件直流漂移的影响。利用拍波干涉仪监视等光强状态的双谱线信号分离方法调节可调增益交流放大器的增益。整流滤波器把方波信号转换成直流信号。

2. 反相开关: 保证系统在两个等光强工作点上均处于负反馈状态。利用反相开关实现双等光强工作点的互换。

3. 差动放大器: 反相开关后的差动放大器用来获得反映双波长光强差的误差信号。

4. 积分器: 在系统中引入积分器, 使输出直流电压按正比于直流误差信号电压的积分而变化, 以保证系统闭环时能正常工作。

5. 高压放大器: 把积分后的误差信号放大到足以驱动压电陶瓷(PZT)工作的电压幅度。高压放大器上设有直流高压电平调节旋钮以便在系统进入闭环工作之前寻找等光强稳频工作点。

6. 激光器: 激光器是被控制对象, 也是环路的一个组成部分。红外双线 He-Ne 激光器腔长  $L_0 \approx 500 \text{ mm}$ , 等光强输出总功率  $P_{\lambda_1+\lambda_2} > 0.8 \text{ mW}$ , 理想的双谱线功率-腔长调谐曲线示于图 2。

探测器、放大器和压电陶瓷等均具有非线性, 因此环路分析比较复杂, 但实际环路仅在闭环初及遇到特大干扰时才进入非线性区, 一般则工作在工作点附近的很小区域内。为了简化对环路的动态特性分析, 将其环路部件线性化, 即以工作点附近的一条直线来代替实际部件的特性, 此时环路特性可用传递函数描述。环路各主要部分的输入、输出、传递函数汇总在表 1 中。

令  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$ , 可得系统闭环传递函数为

$$G_B(S) = \frac{G(S)}{1 + H(S)G(S)} = \frac{1}{(T/K)S + 1} \quad (1)$$

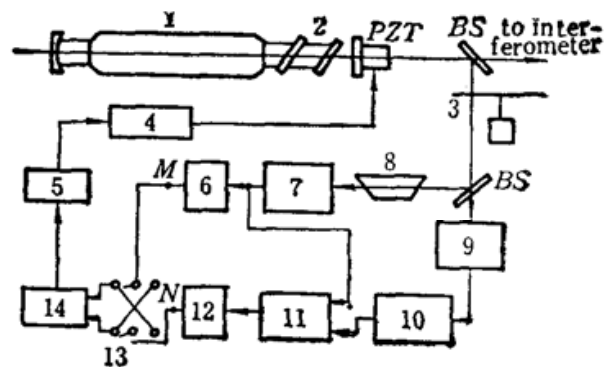


Fig. 4 Frequency stabilization system of 3.39  $\mu\text{m}$  dual-line He-Ne laser

1—dual-line laser; 2, 8— $\text{CH}_4$  cell; 3—chopper; 4—HV amplifier; 5—integrator; 6, 12—rectifier & filter; 7, 9—In-As detector; 10—adjustable-gain AC amplifier; 11, 14—differential amplifier; 13—reversing switch

Table 1. Transfer function of each component part of the stabilization servo-loop

	Input	Output	Transfer function	Note
Integrator	Error voltage	Voltage	$K_1/T \cdot S$	
HV Amplifier	Voltage	Voltage	$K_2$	
PZT	Voltage	Displacement	$K_3$	Approximate proportional link
Laser	Displacement	Intensity difference	$K_4$	
Conversion part	Intensity difference	Error voltage	$K_5$	

这是一个典型无差系统(稳态误差为零)。当功率差  $\Delta P$  偏离  $\Delta P_0$  时, 比例环节首先起作用, 然后积分环节起作用。提高比例环节的增益, 可提高系统的响应速度。

#### 四、稳定性实验

由激光原理, 激光器腔长  $L_c = q \cdot \frac{\lambda}{2}$  (其中  $q$  取整数,  $\lambda$  是增益介质中的波长), 故在腔长连续变化的过程中, 振荡频率将向一个方向连续调谐, 输出功率也发生相应的变化。当由于腔长变化使  $q$  增加或减少, 即发生所谓“跳模”现象时, 振荡频率得以“复现”, 输出功率也基本按照先前的规律随腔长变化。因此, 单波长功率-腔长调谐曲线变化的周期为  $\lambda/2$ 。双波长的情况与单波长基本类似。由于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  各自的功率-腔长调谐曲线变化的周期不同 ( $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ), 所以随着腔长的变化, 两条谱线的功率-腔长调谐曲线的相对位置发生错动。在某些位置, 调谐曲线同相; 在另一些位置, 调谐曲线反相。腔长每改变半个合成波长  $\lambda_s/2$  ( $\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ ), 双谱线功率-腔长调谐曲线的相互位置发生一次周期性重复。当考虑谱线竞争效应时, 由于  $3.3922 \mu\text{m}$  和  $3.3912 \mu\text{m}$  两谱线共用上能级, 所以, 同相调谐曲线的变化幅度(功率)比其它位置上的非同相调谐曲线的变化幅度小得多; 反相调谐曲线在等光强工作点(见图 5,  $A$  是反相调谐曲线上的一个等光强工作点)处的斜率比单波长调谐曲线对应点处的斜率大得多, 即输出功率对腔长的变化更敏感。邹大挺和本文作者利用精密位移机构和 PZT 相结合调节腔长, 使用双笔记录仪记录功率-腔长调谐曲线, 先后从实验上证实了上述分析。当激光器在伺服回路作用下稳定工作在等光强点譬如  $A$  上时(见图 5), 利用记录仪可以记录双线功率随时间变化的情况, 根据记录结果测得功率变化量  $\Delta P_{\lambda_1}$ , 利用稳定性实验开始(或结束)时记录下的功率-腔长调谐曲线测得  $P_{\lambda_1}$ , 由图 5 的几何关系得

$$\Delta L_c = \frac{\lambda_1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_1}} \quad (2)$$

式中  $\Delta L_c$  是与  $\Delta P_{\lambda_1}$  对应的腔长变化量。根据式(2), 由频率稳定度定义得

$$S_{\nu_1} = \left| \frac{\Delta \nu_1}{\nu_1} \right| \approx \left| \frac{\Delta L_c}{L_c} \right| + \left| \frac{\Delta n_1}{n_1} \right| \approx \left| \frac{\Delta L_c}{L_c} \right| = \frac{\lambda_1}{2L_c} \left| \frac{\Delta P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_1}} \right| \quad (3)$$

同理可得

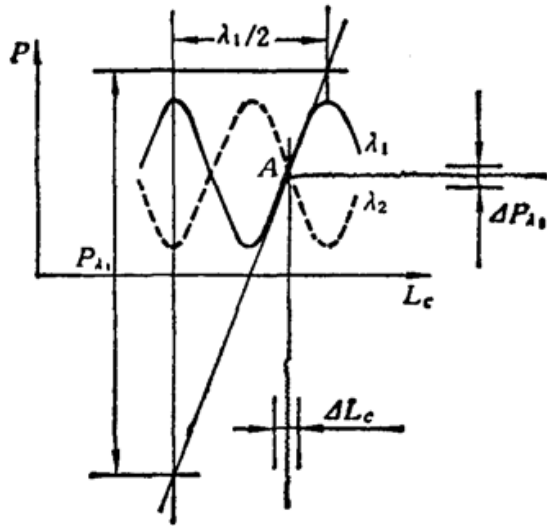


Fig. 5 Estimation principle of frequency stability by means of the power versus cavity-length tuning characteristic

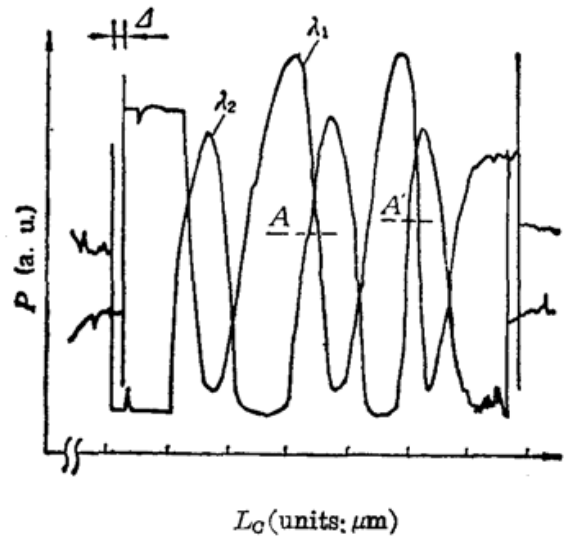


Fig. 6 Power versus cavity-length tuning characteristic (measured)

$$S_{\nu_1} \approx \frac{\lambda_2}{2L_c} \left| \frac{\Delta P_{\lambda_2}}{P_{\lambda_2}} \right| \quad (4)$$

$\Delta P_{\lambda}$  越小, 频率稳定度越高。

稳定性实验需要极大耐心。实验时, 首先预热激光器一小时, 然后利用拍波干涉仪观察激光等光强工作状态, 反复调节激光器腔长迫使其出现两个对称的等光强工作点并同时记录腔长调节过程中的功率-腔长调谐曲线, 最后进入闭环, 用记录仪记录双线功率随时间的变化情况(见图 4, 从  $M$ 、 $N$  两点提取反映功率变化的信号电压), 开始稳定性实验。实验的典型结果包括两部分: 一部分是功率-腔长调谐曲线, 从该曲线可以测量出估算频率稳定度所需要的  $P_{\lambda_1}$  和  $P_{\lambda_2}$ (见图 5); 另一部分是两条由记录笔画出的、反映实验时间内功率起伏的数米长的“直线”。从该部分可以测得估算频率稳定度所需要的  $\Delta P_{\lambda_1}$  和  $\Delta P_{\lambda_2}$ (见式(3)和(4))。为了保证  $P_{\lambda}$  和  $\Delta P_{\lambda}$  的可比较性, 记录仪在记录这两部分曲线时必须采用相同的信号放大倍率。图 6 是实际记录的功率-腔长调谐曲线, 把  $\lambda_1$  线左移  $\Delta$ ( $\Delta$ 是记录笔间的起始间距)可以发现, 两个等光强工作点相对于  $\lambda_2$  线的分布基本对称。根据作者的三次实验(最短 120 min, 最长 210 min)所记录的曲线测得  $P_{\lambda_1}/\Delta P_{\lambda_1} \approx 87, 82, 92$ ;  $P_{\lambda_2}/\Delta P_{\lambda_2} \approx 78, 74, 84$ 。由式(3)和(4)并利用腔长数据, 按最不利结果推知双谱线  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的频率稳定度均优于  $4.5 \times 10^{-8}$ 。

测量稳频伺服回路中双谱线功率信号波动量, 借助于功率-腔长调谐曲线判断频率稳定度的方法是一种间接测量法。该方法简单、方便, 所需仪器少, 但没有直接测量法直观、精确, 推算频率稳定度有一定误差, 压电陶瓷(PZT)扫描速度不均匀对结果的影响最大。估计各项误差对频率稳定度结果的综合影响不大于五分之一数量级。

作者感谢清华大学梁晋文教授、杜继祯高级工程师、田芊老师和邹大挺博士在工作中给予的指导和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 H. Matsumoto, *Appl. Phys.*, **24**, 65(1981)
- 2 邹大挺 *et al.*, 中国计量测试学会光干涉测量与应用技术讨论会论文(1988)