

6328 埃氦氖激光器的频率稳定*

中国计量科学研究院激光组

提 要

本文介绍了 6328 埃氦氖激光器频率稳定的原理。对激光稳频器进行了分析,提出了各个环节的要求及所需采取的措施。利用鉴频曲线对稳频系统进行了测量,得到的长期稳定性优于 4×10^{-9} 。给出了与目前长度基准 ^{86}Kr 波长比对的结果:

$$\lambda_{\text{真空}} = 6329.91416 \text{ 埃 } (^{20}\text{Ne})$$

$$\lambda_{\text{真空}} = 6329.90223 \text{ 埃 } (^{22}\text{Ne})$$

一、引 言

在计量技术中, 6328 埃氦氖激光器的应用已很广泛, 由于激光频率(波长)随谐振腔长度的变化而漂移, 所以往往不能直接用于各种高精度的测量。

环境温度的变化、机械振动等外界干扰对激光频率稳定性影响很大。当使用殷钢或石英等温度系数很小的材料支承腔反射镜, 而温度变化为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 时, 能使腔长产生 10^{-8} 的变化, 因此也就有同样程度的频率漂移。由于激光管是个发热体, 要使谐振腔的温度变化小于 0.01°C 是非常困难的, 因此企图用恒温 and 减振的方法来得到 10^{-8} 以上的频率稳定性是很难达到的。而且, 频率的复现性也不易解决。所以要得到 10^{-8} 以上的频率稳定性, 必须使用伺服控制系统对激光器进行稳定。

二、激光频率稳定的方法

激光频率稳定的方法很多, 大体可以分成两类。一类是用激光输出功率曲线来进行稳频, 其中最常用的是将激光频率稳定在输出功率曲线的兰姆下陷的中心。这种方法装置简单, 稳定性可达 10^{-9} , 适用于一般的精密测量; 另一类是利用外界参考作为频率标准对激光频率进行稳定, 例如采用内(或外)吸收室作为外界参考频率的装置。这种装置比较复杂, 但可以得到很高的频率稳定性和复现性。本文简单介绍将激光频率稳定在兰姆下陷中心的方法。

下面简述这种方法的原理。图 1 示出了激光输出功率—频率曲线, 根据兰姆理论^[1], 功率在原子跃迁中心频率 ν_0 处有一个极小值, 称为兰姆下陷。由于它仅与原子跃迁中心频率有关, 因此可以选择作为一个很好的频率稳定点。

* 1972 年 10 月 19 日收到。

如果开始腔模位于频率 ν 处, 并在压电陶瓷上加一正弦信号使谐振腔长产生一个调制时, 腔模频率也产生 $\delta\nu$ 的调制, 同时激光器输出功率就产生 δG 的变化量, 如图 1. 如调制量不变时, δG 仅与曲线在该点的斜率有关. 当 ν 离激光跃迁中心频率 ν_0 越远时 δG 越大, 因此可将 δG 看作为误差信号. 当腔模处于 ν_0 的左右两侧时, 曲线斜率的符号相反, 因此 δG 也将反相, 故可通过鉴相方法来判别其方向. 用光电元件接收光强并从中取出交流信号 $U(\delta G)$, 经放大后与调制信号(参考电压)同时输入相敏检波器, 再经积分放大器后去驱动压电陶瓷以调正谐振腔长度, 最后将腔模调到兰姆下陷中心 ν_0 附近, 图 2 为实现上述原理的方框图.

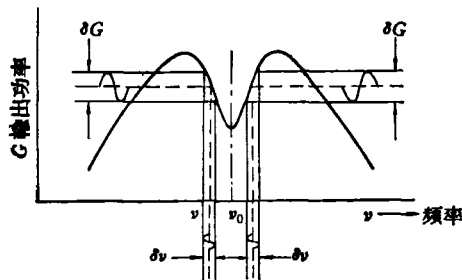


图 1 借助激光输出功率-频率曲线的稳频原理图

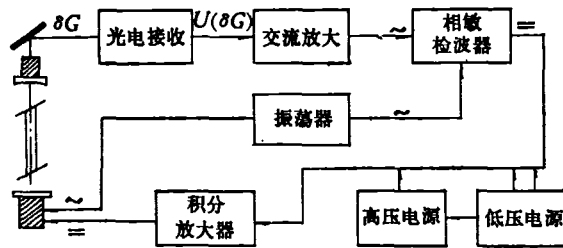


图 2 激光稳频器方框图

三、激光稳频器(伺服控制系统)

下面简述按图 2 所设计的稳频器各个环节的要求和性能.

用硅光电三极管作为接收元件, 并采用隔直流电容将它与交流放大器连接, 以避免大的直流电流增益引起放大器噪声的增加. 交流放大器选用双 T 选频放大, 为了减小干扰, 除功率放大外, 其余均和光电元件一起装在屏蔽盒中. 前两级工作在固有噪声尽可能低的状态. 整个交流放大器的增益 $K_2 = 95$ 分贝, 带宽为 ± 20 赫, 折合到输入端的噪声低于 0.3 微伏.

相敏检波器采用环形相敏桥. 参考源由振荡器供给, 是幅度为峰-峰 30 伏的正弦波. 相敏检波的时间常数 $\tau_3 = 0.02$ 秒, 传递比 $K_3 = -14$ 分贝. 振荡器除供给相敏检波外, 还输出一个峰-峰为 0 到 1 伏的可调正弦波, 将它加到激光谐振腔的压电陶瓷上, 以对腔进行调制. 调制频率约为 1000 赫.

积分放大器由两级差分放大组成, 第二级差分使用了耐高压管, 供电电源为 280 伏, 这样两个集电极的输出电压可在 ± 240 伏的范围内保持线性. 积分放大器的无反馈增益约为 80 分贝, 加入负反馈后的增益 $K_4 = 60$ 分贝. 时间常数 $\tau_4 = 40$ 秒. 积分放大器是整个回路的重要环节, 它对系统的稳定性, 时间常数以及控制范围有直接的影响.

由于积分放大器的输出和调制信号迭加后加到压电陶瓷上, 因而有一个 $K_5 = 1$, $\tau_5 = 0.5$ 秒的环节.

若光学鉴频器的频率偏移 $\delta\nu$ 和光电接收元件的输出电压 $U(\delta G)$ 之比为 K_1 , 而压电陶瓷上的电压变化和激光频率变化 $\delta\nu$ 之比为 K_0 , 系统开环时的传递比为 K , 则 $K = K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5$. 显然 K 越大, 系统控制的静偏差越小. 该系统的增益最大可到 70 分贝.

但系统近似存在三个惰性环节,因此开环增益必须满足下列不等式:

$$K < 2 + \frac{\tau_3}{\tau_4} + \frac{\tau_3}{\tau_5} + \frac{\tau_4}{\tau_3} + \frac{\tau_4}{\tau_5} + \frac{\tau_5}{\tau_3} + \frac{\tau_5}{\tau_4}$$

根据计算 $K < 2100$ 时,系统才能稳定. 如果扰动引起 2×10^{-6} 的激光频率变化,则经过控制后可达到 1×10^{-9} , 这 and 实际测量结果基本一致. 由上式可知, τ_4 越大,所允许的 K 就越大,但是增加 τ_4 会使系统的快速响应变坏. 闭环系统的时间常数约 $\tau = \tau_4/K = 0.02$ 秒,实际测量约为 0.05—0.1 秒.

激光稳频器的响应特性是这样测定的,当系统闭环时,在另一压电陶瓷上输入一频率 f 的扰动电压(峰—峰值为 6 伏),同时测量控制压电陶瓷上的补偿电压,这两个电压的比值随 f 而变化,因此可以鉴定系统快速响应的好坏(图 3). 图中在 10 赫处出现一个次峰值,这可能是由于几个惰性环节组合造成的. 幅值下降 3 分贝的频率在 10 赫左右.

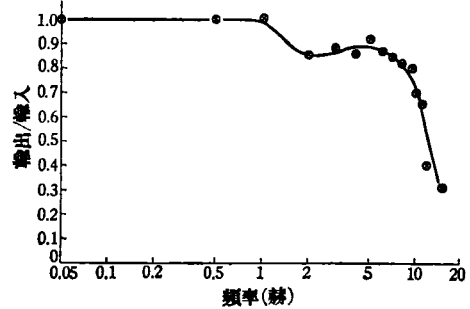


图 3 激光稳频器的频率响应

四、氦氖激光管

通常的稳频激光器不仅要求在主模 (TEM_{00}) 输出,并要求为纵向单模. 为此,激光器的谐振腔由一平面镜和一凹面镜组成,后者的曲率半径约为 1 米,适当地调节反射镜便很容易得到主模输出. 另外,应该使用较短的谐振腔,在我们的装置中,谐振腔长为 230 毫米,即纵模间隔约为 650 兆赫. 这时,当某一纵模在兰姆下陷的中心时,两侧相邻的纵模就可以调出净增益曲线,从而保证输出为纵向单模.

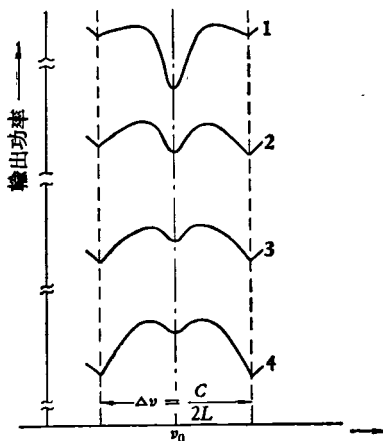


图 4 兰姆下陷深度和输出功率的关系. 1, 2, 3, 4, 表示不同的放电电流.

频率稳定性与兰姆下陷中心两侧的斜率有关,斜率越大,稳定性越好. 因此,为了得到较高的频率稳定性,应该增加兰姆下陷的深度. 增强激光输出功率,能使下陷加深(见图 4)¹⁾. 除了应使用反射率较高的反射镜外,还应调节放电电流以得到最佳输出,因为对于不同的放电管参数,放电电流的最佳值是不同的. 此外,放电长度,毛细管直径,充气压力等都会影响输出功率. 为了使频率稳定性优于 4×10^{-9} ,应使兰姆下陷的深度大于输出光强的八分之一.

兰姆下陷线形的对称性对频率稳定性也有影响. 根据稳频原理,误差信号与激光调谐曲线的斜率有关,若兰姆下陷线形不对称,则两侧的斜率不同,因而误差信号也不同. 在斜率大的一侧误差信号大,因此激光

1) 影响气体激光出现兰姆下陷的主要因素来自两个方面:压力增宽和功率增宽. 因此,在激光管内气压过高或功率太强,都可能不出现兰姆下陷. 我们这里指的是当功率不太大时的情况.

输出能比较“准确地”调到下陷的中心，而另一侧则不能。兰姆下陷线形不对称的原因是同位素气体不纯引起的。因此，对 ^{20}Ne 或 ^{22}Ne 的丰度应有所要求。我们所用的 ^{20}Ne 或 ^{22}Ne 同位素气体的丰度为 99.6—99.8%。

五、结果和讨论

我们利用鉴频曲线(即“S”曲线)对稳频器的长期稳定性进行鉴定。

先将系统开环，在另一压电陶瓷上加一锯齿波电压，并由记录仪记录相敏检波器的输出，这就得到了鉴频曲线。

图 5 给出了典型的鉴频曲线(即兰姆下陷的微分曲线)的照片，照片中同时还记录了交流放大器的输出信号。图中 C, D 两点是谐振腔扫描时的换模点，A, B 两点是由兰姆下

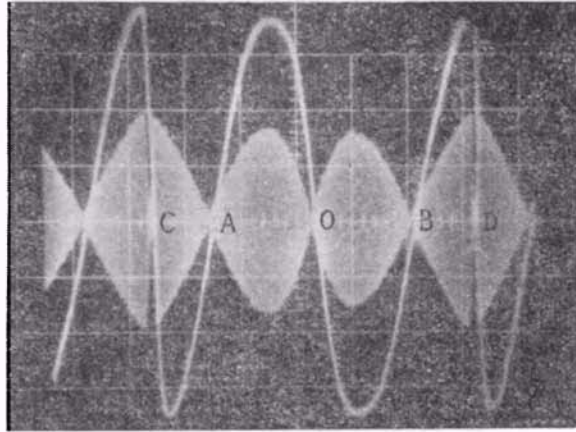


图 5 鉴频曲线(扫速 1 秒/格; S 曲线 20 伏/格; 基波 5 伏/格)

陷造成的输出功率的极大值，O 点是兰姆下陷的中心。在 O 点附近鉴频曲线接近于直线，而 C, D 两点的间隔即等于相邻纵模的频率差，因此，通过计算就可以得到纵坐标的格值，即与每格相当的离中心频率的偏差量。为了估计稳频器的长期稳定性，在得到鉴频曲线后，立即去掉锯齿波电压并将系统闭环，同样记录相敏检波器的输出。根据输出的漂移就能很容易地确定激光频率的不稳定性。

我们在恒温的实验室中，将激光器放在一防震的地基上，采用上述的稳频器后，长期稳定性达 4×10^{-9} 。并且已将其波长与长度基准 ^{86}Kr 灯的 6057 埃谱线作了对比，结果是

$$\lambda = 6329.91418 \pm 0.00006 \text{ 埃 } (^{20}\text{Ne}),$$

$$\lambda = 6329.90223 \pm 0.00006 \text{ 埃 } (^{22}\text{Ne}),$$

其中所给的误差是十次测量平均值的极限误差。上述结果与美、英、西德对光谱物理学公司的 119 型激光波长测量结果是一致的^[2]。目前，这种稳频激光器已经用于各种精密测量。

由于激光输出的中心频率 ν_0 随气压及混合比而变化，并且也受塞曼效应和斯塔克效应的影响，因此，这种方案的稳定性虽然可达 10^{-9} 或更高一些，但其复现性却很差，仅为

1×10^{-7} 左右^[2]。这样的稳定性和复现性已能满足一般精密测量的要求。如果要求有更高的复现性,需要采用其他方案,例如利用外界参考标准(如吸收室等)对激光进行频率稳定^[3]。

参 考 文 献

- [1] W. E. Lamb, Jr., *Phys. Rev.*, A **134** (1964), 1429—50.
- [2] K. D. Mielenz, K. F. Nefflen, W. R. C. Rowley, D. C. Wilson and E. Engelhard, *Appl. Opt.*, **7** (1968), 289.
- [3] 稻田光一,应用物理, **38** (1969), 306.