

# 主动稳频连续波可调谐环形染料激光器电子学控制系统

陈淑媛 赵之予 彭忠琦

**摘要** 我们研制的主动稳频连续波可调谐环形染料激光器, 其波长范围从 5700 Å ~ 6200 Å 可以连续调谐; 激光频率短期稳定性小于 1MHz; 长期激光频率稳定性在一个小时之内小于 100MHz; 并且可以自动连续扫描 30GHz 不跳模。

论述在环形腔外采用一个高精度、高稳定性的光学参考腔 (即为光学鉴频器), 将激光频率的不稳定性鉴别出来, 通过三路电子学控制系统, 对环形染料激光器腔内几个激光频率调谐元件进行反馈控制, 并且可以对激光频率进行自动锁定扫描跟踪控制。

## 一、引 言

我们研制的主动稳频控制环形染料激光器, 是在 801A 型连续波可调谐环形染料激光器的基础上, 采用高精度的光学参考腔, 通过电子学控制环路, 对环形染料激光器腔内几个频率调谐元件进行反馈控制, 使染料激光器的输出激光频率达到极窄的光谱线宽和很低的频率漂移。这种高分辨率、高稳定性的激光器, 在激光光谱学、激光化学及同位素分离试验等许多科学技术研究方面, 是一种较为理想的测试仪器。

本文着重阐述了环形染料激光器主动稳频控制的电子学系统。

## 二、主动稳频环形染料激光器电子学控制工作原理

对 801A 环形染料激光器, 由于在激光腔内的机械结构的抖动, 声音的感应、空气压力的变化及染料喷流中气泡影响, 使其光谱线宽为 20MHz ( $t > 1s$ )。

对标准具锁定环路不能解决激光器频率稳定的问题, 只能修正由于标准具的漂移; 反射镜压电陶瓷的非线性和扫描过程中的滞后, 所引起的误差。控制环路把标准具的透过峰锁定到激光振荡腔模上及维持同步扫描, 它不能防止一些快速干扰引起的跳模。

要做到激光的频率短期稳定到 1MHz 以内, 长期频率漂移小于 50MHz, 必须设计一个高稳定的参考腔, 该腔能够对某些机械振动、声音的感应、温度的变化、气压和气流的变化采取相应的措施, 使短期和长期稳定性超出要求指标 5 倍以上。只有这样, 才能以它做为基准 (实际上是一个标准的光学鉴频器) 通过这个参考腔把激光的频率变化鉴别出来, 再通过两个电子学环路反馈控制环形腔内的检流计板和  $M_2$  反射镜, 将激光的频率稳定到环形腔外参考干涉仪上。如图 1 所示。

参考腔内实质上是一个高稳定的参考干涉仪, 自由光谱区为 1GHz, 精细系数为 2, 这

个低精细系数干涉仪的传输函数类似于正弦波。

其传输函数的表达式为：

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2 \phi} \quad (1)$$

其中  $\phi = 2\pi n d f / c = \pi f / FSR$

- $T$  —— 透过率
- $n$  —— 折射率
- $d$  —— 两镜之间距
- $FSR$  —— 自由光谱区
- $f$  —— 频率
- $c$  —— 光速
- $r$  —— 反射系数

$$T_{max} = 1; \quad T_{min} = \frac{(1-r)^2}{(1+r)^2}$$

当从工作点频率  $f$  偏离  $\Delta f$  时，透过率变为：

$$T(f + \Delta f) = 1 + \frac{1}{2} \frac{d^2 T}{df^2} (\Delta f)^2$$

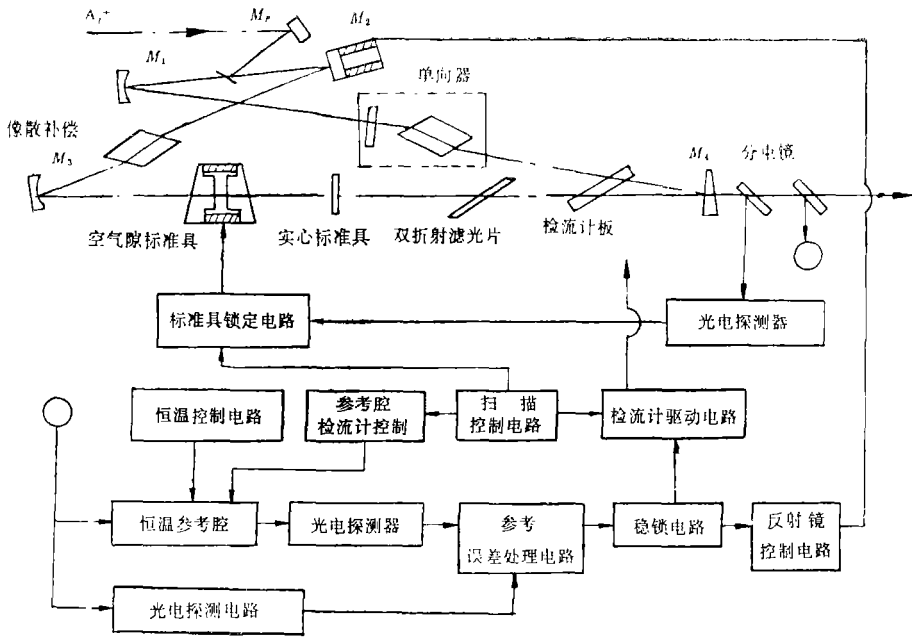


图1 主动稳频原理方框图

其中  $\frac{d^2 T}{df^2} = -\frac{8r}{(1-r)^2} \cdot \left(\frac{\pi}{FSR}\right)^2$

则  $\Delta T = \frac{\Delta r}{(1-r)^2} \left(\frac{\pi}{FSR}\right)^2 (\Delta f)^2$

当  $r = 0.7; FSR = 1\text{GHz}$   $\Delta f = 1\text{MHz}$  时  
 相对透过率的变化  $\Delta T = 3 \times 10^{-4}$

该值为理论上计算干涉仪的灵敏度提供了依据。

应该指出的是参考干涉仪的透过率函数，只有当光束的功率在整个光频变化期间保持恒定时，才能维持不变。等于传输函数。但是，实际上光束的功率是在变化的，因而产生了误差。为消除激光功率变化的影响，控制环路中采用了除法器，如图 2 所示。

从参考干涉仪来的传输信号  $I_1$  中含有频率变化的函数和强度变化的函数，相除之后，消除强度变化函数，得到了真实的传输比函数。

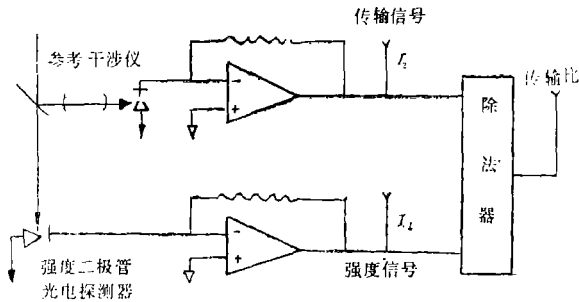


图 2 除法器原理图

在初始情况，选择激光频率应工作在参考干涉仪干涉条纹最陡的地方，这点对激光频率变化最灵敏，可以得到最大的鉴频性能。将激光频率的变化转换成激光幅度的变化，通过光电接收器，转换成电信号，分别送到检流计控制环路和反射镜控制环路。如图 3 所示。

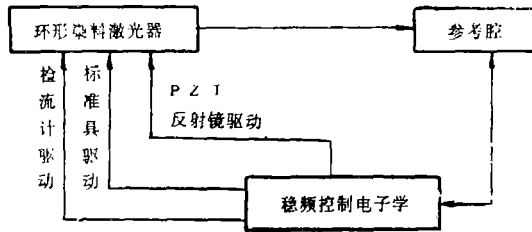


图 3 激光频率稳定控制系统

当激光频率变化时，离开干涉仪原来的工作点，输出一定的误差信号将分别送到两个控制环路，对环形腔内的频率调谐元件进行控制。其中一部分缓慢变化的信号，通过检流计驱动环路进行控制，而另一部分快速变化的信号，通过反射镜控制环路进行修正，迫使激光频率回到原来的频率。系统修正的量小于 1GHz，环形腔模的间隔是 200MHz，可以修正  $(\pm 1)$  2 个腔模间的跳模。因此，对于一些没有突然大的抖动，完全可以做到激光的频率稳定。

采用参考干涉仪稳定的激光频率，有时需要连续扫描 30GHz 工作，因此，参考干涉仪的频率也必须被扫描，用转动装在参考干涉仪内的检流计扫描，对于环形腔和参考腔扫描不同步的量，通过检流计控制环路修正。借以实现在扫描 30GHz 的过程中维持激光频率的稳定。

### 三、稳频控制系统设计

#### 1. 系统输入端的设计

根据上述的理论计算，对参考干涉仪其自由光谱区 (FSR) 为 1GHz，精细系数为 2，

当偏离中心频率为1MHz时,透过率的变化 $\Delta T \approx 3 \times 10^{-4}$ 。假定干涉仪在最大斜率处灵敏度提高3倍,当光通过干涉仪后,传输峰的电压为 $U_p = 1V$ ,则相应1MHz光频的变化,输出电压的变化为 $\Delta U = 3mV/MHz$ 。

染料激光器输出功率一般在50mW~500mW之间变化。取其光强的1%作为系统的输入信号,则通过参考干涉仪射到光电接收器的光为0.5mW~5mW。当接收器的灵敏度为0.256mA/mW,负载电阻为1kΩ时,对于1MHz的光频变化,相应的电压信号变化在0.384mV~3.8mV。是系统的最小输入信号范围,由此确定系统输入端的噪声要小于40μV,前置放大器的输入噪声要小于5μV。

在整个工作过程中,系统不跳模的最大频偏为200MHz。在同样条件下系统的最大输入信号范围在76mV~760mV,完全在系统的线性工作范围内。

由于采用的光电转换器是低阻器件,因此,设计放大器的输入阻抗大于10kΩ。

### 2. 反射镜控制环路的设计

如前所述,激光频率变化时,通过光学鉴频器,将激光频率的变化转换成激光强度的变化,被光电转换器转换成电压的变化,再与强度信号相除,得到比例于频率变化的误差信号,对于一些快速变化的误差信号通过低压放大器 and 高压放大器,驱动装在反射镜上的压电陶瓷(PZT)伸长或缩短,达到微调激光腔长。稳定激光频率的目的。如图4所示。PZT驱动反射镜控制环路,要求压电陶瓷的频率响应要快,并且在此间没有共振点。由于压电陶瓷是一个容性负载,在高频时会引起一定的滞后。必须在电子学环路中进行补偿。

PZT环的频率响应低频到20Hz,高频到4kHz。系统跟踪范围要做到200MHz。因此选择压电陶瓷的灵敏度为1MHz/V。高压放大器要提供200V的变化电压。供电电源为400V,系统的输出噪声要小于200mV,如图5所示。

我们把光学鉴频器(参考干涉仪)、光电转换器、放大器和除法器称为光分析器。由前面分析,系统的最小输入信号为0.38mV,前置放大器,放大30倍。则光分析器高的 $K_1 = 10mV/MHz$ ,PZT的灵敏度 $K_4 = 1MHz/V$ ,反相放大器 $K_2 = -30$ ,总的开环增益为 $1mV/0.38mV = 2500$ ,则高压放大器增益

$$K_3 = \frac{K_{总}}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_4} = 10$$

### 3. 检流计控制环路的设计

该环路主要用来消除激光频率的慢漂移和一些低频抖动。如图6所示。

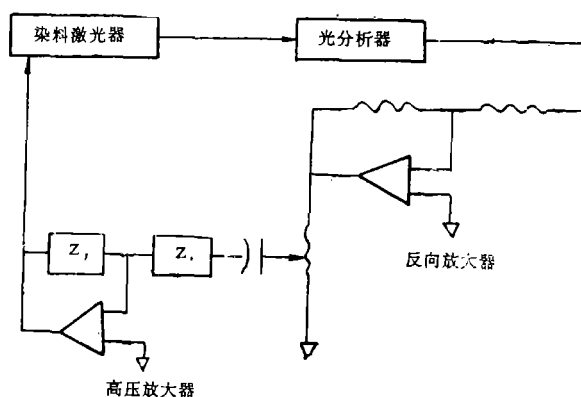


图4 PZT 环路原理图

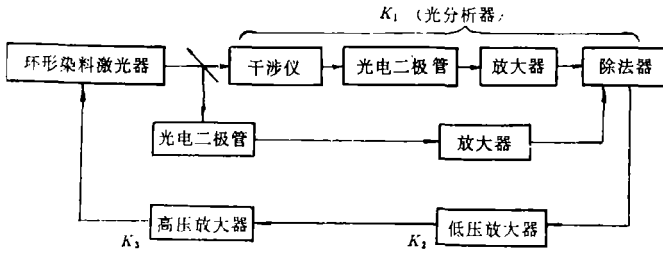


图 5 PZT 环路方框图

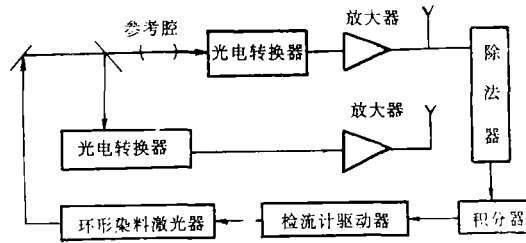


图 6 检流计环路原理图

我们选择光频工作在干涉条纹最陡的部分作为鉴别频率，借以获得最佳的鉴别性能。如图7(a)所示。A点即是所期望的锁定点。

实际上，A点还存在某一直流量“K”值，环路可使其负向移动同量“K”值，使最大斜率在零处，如图7(b)所示。

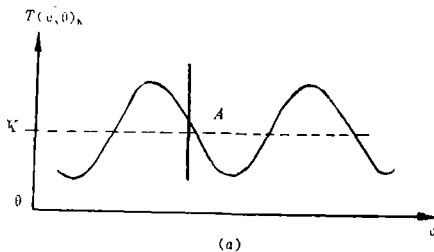


图 7 环路稳定工作点

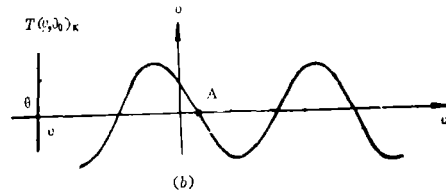


图 8 环路稳定工作点

当光频不在期望的锁定点，有一小量的偏离，若  $T(v, \theta)_k$  大于零，激光频率偏低。通过检流计驱动器，反馈控制检流计板使光频增加，回到期望的锁定点。若  $T(v, \theta)_k$  小于零，激光频率偏高，通过检流计驱动器带动检流计板使激光频率减小，迫向期望的工作点A。

在环路工作中，每个元件相对于电的频率都存在有限的相位量。开环工作时，环形腔内最关键的元件是检流计，它将强烈的振荡在150Hz左右。因此，在检流计内部装有位置敏感元件，作为电子学的位置反馈和速度反馈。检流计响应到400Hz时有90度的相位滞后。在环路内部采用积分线路，使在零点有一极点，并且有90度的相移，以满足位置随动系统的要求，如图9所示。

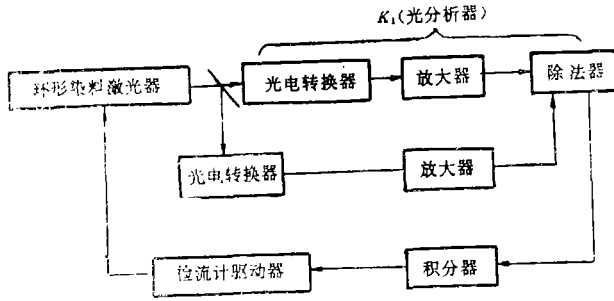


图9 检流计环路方框图

根据前面的计算，在光强为50mW时，系统前置放大器放大100倍时，光分析器最小输出信号为38mV/MHz ( $K_1$ )。

检流计采用上海激光技术研究所研制的动铁式检流计。根据检流计和驱动器的性质，当驱动器输入5V的电压信号时，检流计可扫描30GHz，其灵敏度为6MHz/MV ( $K_2$ ) 积分器的时间常数为 $\tau_1 = R_1 C$ 。如图10所示。

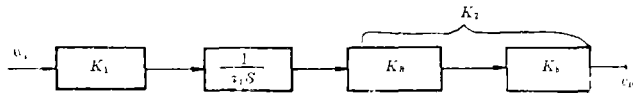


图10 环路开环分析图

$$K_1 = \frac{\Delta u_1}{\Delta v_1} = 38\text{mV/MHz}$$

$$K_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta u_2} = 6\text{MHz/MV}$$

则 
$$v_0 = v_i \times K_1 \times K_2 \times \frac{1}{\tau_1 S}$$

$$\frac{v_0}{v_i} = \frac{\Delta u_1}{\Delta v_1} \times \frac{\Delta v_2}{\Delta u_2} \times \frac{1}{\tau_1 S}$$

令 
$$S = j\omega$$

$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{38\text{mV}}{\text{MHz}} \times \frac{6\text{MHz}}{\text{mV}} \times \frac{1}{jR_1 C \omega}$$

令 
$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{-1}{j}$$

当 
$$\omega = 2\pi \cdot 300\text{Hz}$$

则 
$$-\frac{1}{j} = \frac{228}{R_1 C \times 2\pi \times 300}$$

$$R_1 C = 0.12\text{S}$$

当  $C = 0.1\mu\text{f}$  时  $\cdot R_1 = 1.2\text{M}\Omega$

## 四、结 果

新研制的主动稳频电子学系统加之改进的 801A 型扫描跟踪控制系统, 与环形染料激光器参考腔进行联式, 经过多次重复测试, 完全达到技术指标的要求, 对所要求的激光频率可以稳定的锁定长达 1 个小时以上不跳模。并且稳定点的激光频率在一个小时内漂移量小于 50MHz, 短期激光频率稳定性小于 1MHz ( $t < 5s$ ), 可以连续扫描 30GHz 不跳模。扫描时间可以选择在 1s~300s 秒之间, 还设有外扫描和手动控制。这种高精度的环形染料激光器, 在国内有着广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] R.L.Barger, J.B.West; Appl. Phys. Letters, 27.33 (1975).
- [2] S.M.Jarrett, J.P.Young; Optics Letters, 4.No.6 (1979).
- [3] W.G.Divens, S.M.Jarrett; Rev. Sci. Instrum., 53 No.9 (1982)

## Electronic Control System for Active Stabilized Frequency Ring Dye Lasers

Chen Shuyuan, Zhao Zhiyu and Peng Zhongqi

### Abstract

Laser is now used in many fields of science researches, especially in laser spectroscopy, laser chemistry and isotope separation.

It is required precisely and characteristically for the lasers to operate with stable frequency, narrow spectrum range and continuously regulated wavelenghtes.

We have succeeded in researching for and making out an active stabilized frequency ring dye laser. Its wavelength range is from 5700 Å to 6200 Å and can be regulated continuously.

The short-term stabilization of the laser frequency is no more than 1MHz and its long-term stabilization is less than 100MHz during one hour. The laser automatic scanning range is over 30 GHz without mode-hop.

The main theory of stabilization of this kind of laser is based on a high precise interferometer used for detecting the variability of the laser frequency. Depending on three electronic control systems, we take feedback controls on several turnable elements for stabilizing frequency. This laser electronic control system also uses an automatic locking method.

This paper gives emphasis on the analysis about the technique of stable laser frequency control system.