

采用快速压电陶瓷调频元件提高染料激光器的频率稳定度

汤俊雄 田云鹏 郑乐民

(北京大学无线电系)

提要: 研究了压电陶瓷腔镜及其支架的机械共振,抑制了支架的本征振动,并设计了快速频响压电陶瓷腔镜,其最低共振频率为 125 kHz,对 380-A 染料激光器进行了稳频,使其线宽减少到 300 kHz_{P-P}。

Improving frequency stability of dye laser with a fast PZT frequency transducer

Tang Junxiong, Tian Yunpeng, Zheng Lemin

(Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing)

Abstract: Mechanical resonance between the PZT cavity mirror and the holder is studied. The resonating eigenmodes of the holder have been suppressed. A fast PZT cavity mirror is designed with the lowest resonance frequency of 125 kHz. The dye laser frequency is stabilized with a fast frequency transducer and its linewidth is reduced to 300 kHz_{P-P}.

连续波染料激光器由于受染料喷流不稳、环境振动温度及市电变化等影响,其频率稳定性较差。例如 380-A 染料激光器取样时间小于 1s 时,频率波动为 20 MHz_{P-P}。本实验室前曾对该激光器采用外腔稳频方案,使频率波动下降到 1 MHz_{P-P}^[1]。现仍用压电陶瓷腔镜作为调频元件,但要提高其频响,增加伺服回路带宽以抑制高频噪声。我们探讨并抑制了压电陶瓷腔镜与支架的机械共振,在检测该腔镜共振频率时,除使用传统的电谐振法外,还利用染料激光器谐振腔及法布里-珀罗腔(F-P腔),采用了更有效的检测

法,测得压电陶瓷腔镜最低共振频率为 125 kHz。电子学伺服回路单位增益带宽达到 30 kHz。在检测 F-P 参考腔线宽时,利用电光晶体调相边频法,提高了测定腔线宽的准确性。

一、染料激光器的频率噪声谱

我们用 TF-2370 型频谱仪对染料激光器的频率噪声进行了频谱分析。由于染料激光器频率漂移较大,在使用频谱仪时采用

收稿日期:1986年9月11日。

了两种方法：其一是利用伺服回路把激光器频率锁在 F-P 腔透射峰一侧中点(即为稳频中使用的慢环伺服回路)；其二是把 F-P 腔透射峰锁在激光频率上。

从频谱分析结果可知，染料激光器频率噪声一直延续到 1 MHz 以上(见图 1(a))。且噪声包括有规及无规成份。其中有电源引起的 50 Hz 及其谐波成份(见图 1(b))，这部分噪声幅度较大，它相当于约 6 MHz 的激光频率波动，此外，还检测到噪声中 2 kHz 成份(见图 1(c))，它相当于约 2 MHz 的激光频率波动。除此外，噪声振幅较大的还有 40~80 kHz 的成份(见图 1(d))，这部分噪声相当于约 300 kHz 的激光频率波动。

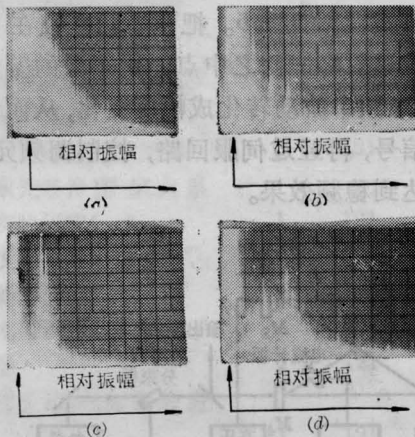


图 1 S-P 380-A 染料激光器频率涨落谱分布

- (a) 100 kHz/div, 1 MHz 处噪声振幅略大于放大器噪声, 1 MHz 傅里叶频率
 - (b) 50 Hz/div, 500 Hz 傅里叶频率
 - (c) 1 kHz/div, 10 kHz 傅里叶频率
 - (d) 20 kHz/div, 200 kHz 傅里叶频率
- (纵坐标为相对振幅; 横坐标为傅里叶频率)

二、快速调频元件的设计及检测

由于染料激光器频率噪声延伸到 1 MHz 以上，须选择频响达 MHz 量级的调频元件。无疑电光相位调制器是较为合适的元件，但把它置入激光腔内，须对腔做光学及机械的调整，这对使用商品激光器的用户难于做到。我们选用压电陶瓷作为调频元件，此方案仅

需改造激光谐振腔的一个腔镜，与使用电光调制器相比，虽然频响较低，但具有简便易行的优点。

但使用压电陶瓷作为快速调频元件，主要障碍是须克服压电陶瓷支架的机械共振。受压电陶瓷驱动的镜片，在振动时激发了支架的本征振动，从而使镜片发生剧烈抖动，且带来很大相移，这样很易造成电路自激。压电陶瓷薄片频响不难达到几百 kHz，但由于机械共振效应，往往频响只能做到 10 kHz 以下。

为提高压电陶瓷腔镜的频响，在设计时应使压电陶瓷振子尽量轻便，为此我们选用镜片直径为 6 mm，厚为 1~1.5 mm。压电陶瓷选用薄片型，在满足指标情况下，质量小一些。我们把压电陶瓷片及镜片粘在一个圆型殷钢小圆柱底座上(见图 2)，而小圆柱用螺钉和激光体相连，在实验中未发现激光腔体的机械共振，但明显地观测到了小圆柱底座的机械共振效应。为抑制底座的机械共振，通常应使底座的本征频率高于或低于压电陶瓷振子的共振频率。我们用的镜架是在稳频中使用的，而激光频率噪声是从直流一直延伸到 1 MHz 以外(见图 1(a))，所以只能使底座本征频率高于压电陶瓷振子的共振频率。这样，在选择底座的直径及厚度时，就必须精心考虑。减小底座的直径，使其径向共振频率升高；减小底座的厚度，使厚度共振频率增加。但实验中发现，底座太薄了会引起扭曲振动，反而会使共振频率下降。采取了若干有效措施以后，我们使压电陶瓷腔镜的频响达到 120 kHz。

测量压电陶瓷驱动镜片的共振频率的常



图 2 压电陶瓷腔镜

由于采用了两个频响不同的调频元件——双电流计平板和压电陶瓷腔镜（前者频响为 500 Hz，后者频响为 120 kHz），伺服回路分为慢环和快环，回路的单位增益带宽为 30 kHz。

从激光器频率噪声分析知道，2 kHz 左右的噪声幅度很大（见图 1(c)），为抑制它，若一味增加级数以提高增益，容易引起电路自激，我们使用谐振回路提升 2 kHz 处增益，有效地抑制了该频率噪声。

四、稳频指标的检测

限于条件，无法进行两台稳频激光器的拍频检测。我们的办法是检测出 F-P 参考腔的鉴频率，然后由误差电压幅值算出激光器线宽。

因此首先要测试 F-P 参考腔的线宽，测试布局见图 6，偏振片和电光晶体构成电光相位调制器，对电光晶体加几十 MHz 高频信号 Ω 。由于相位调制形成边频，当 F-P 腔扫频时，可在示波器上扫出载频 ω_c 和两个边频分量 ($\omega_c \pm \Omega$)，边频及载频间距即调制信号频率 Ω ，这样可由 Ω 数值定出 F-P 腔线宽。图 7 中 $\Omega = 35.7$ MHz，定出 F-P 腔线宽约为 11~12 MHz。为保证腔线宽值可靠，必须排除激光频率波动的影响（取样时间为秒量级时，为几十 MHz），方法之一是激光稳频后，再测定 F-P 腔线宽。方法之二是测量时采取快扫描，时间足够快时，只有较高的频率噪声起作用，而它对激光线宽贡献很小，因此可以忽略激光线宽的影响。我们在测定腔线宽与检测稳频指标使用同一光波长，并随时监测各种参数，以保证实验条件相同。很显然该检测线宽的方法比常规使用的 He-Ne 激光器横模间隔定腔线宽方法准确可靠。

在求 F-P 参考腔鉴频率时，通常把腔透射曲线近似成一个三角形，但考虑到腔的实际线型要做一个修正。图 8 是所拍摄的 F-P

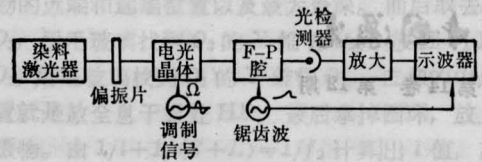


图 6 F-P 腔线宽测试布局

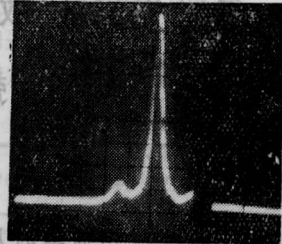


图 7 利用电光调相边带法测量参考腔线宽

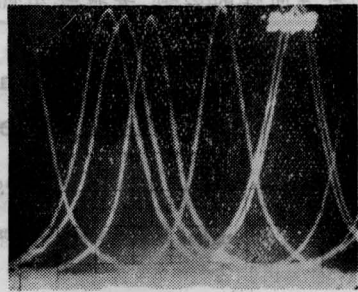


图 8 F-P 腔透射曲线线型图

腔透射曲线图（图中扫腔电压未和示波器扫描同步），显然爱里线型和三角形差别较大。为便于解释，把这种差异夸大一下，如图 9 所示。腔高 14 V，腔线宽 $ab = 12$ MHz， $\frac{14 \text{ V}}{12 \text{ MHz}}$ 即为计算之鉴频斜率（图 9 中虚线所示），它显然小于实际斜率（图 9 中实线斜率）。只有用等效线宽 AB 代替腔的测量值 ab ，才能使鉴频率和实际情况符合。由图 8 知，修正以后，腔等效线宽比腔测量线宽至少窄 20%，以此求得等效线宽小于 10 MHz，这样 F-P 参考腔鉴频率定为 1.4 V/MHz。

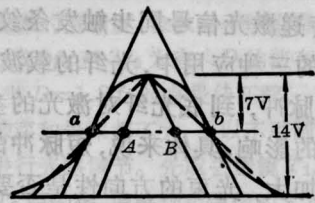


图 9 求 F-P 腔鉴频率时，对腔线宽的修正

（下转第 710 页）

附录

表 A 动量及能量转移碰撞频率计算表达式(单位: 1/s)

$$\nu_{m1} = X_1 N (7.25 - 1.08 \times 10^{-4} T_e) \times 10^{-14} \quad \nu_{m2} = X_2 N (0.7 + 12.79 \times 10^{-4} T_e) \times 10^{-14} \quad \nu_{m3}(\text{Ar}) = X_3 N \sqrt{0.303 T_e} \\ \times (1.21 \times 10^{-4} T_e - 0.2) \quad \nu_{m3}(\text{He}) = 3.47 \times 10^{-16} X_3 N \sqrt{0.303 T_e} \quad \nu_{u1} = 3.5 \times 10^{-15} X_1 N \quad \nu_{u2} = X_2 N (3.2 \times 10^{-4} T_e \\ - 3.4) \times 10^{-15}$$

注: X_1, X_2, X_3 分别为 $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{He}$ (或 Ar) 的组份数, N 为混合气体粒子数密度。

表 B

$$\mathcal{A} = KN \left\{ u \left[\frac{7}{2} X_1 + \frac{7}{2} X_2 + \frac{5}{2} X_3 + X_1 \left(\frac{3380}{T} \right)^2 \exp\left(-\frac{3380}{T}\right) + X_1 \left(\frac{1932.1}{T} \right)^2 \exp\left(-\frac{1932.1}{T}\right) + X_1 \left(\frac{960.1}{T} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp\left(-\frac{960.1}{T}\right) + X_2 \left(\frac{3353.9}{T} \right)^2 \exp\left(-\frac{3353.9}{T}\right) \right] + \frac{1}{KT/mu^2 - 1} \right\}; \quad \beta_1 = k_{23}^2 + k_{34}^2; \quad \beta_2 = k_{32} - k_{23}; \quad \beta_3 = X_2 k_{23} \\ + \sum_{i=1}^3 X_i k_{21,i}; \quad \beta_4 = k_{21,2} - \beta_2; \quad \beta_5 = X_1 \sum_{i=1}^3 X_i k_{01,i}; \quad \beta_6 = \beta_3 - \beta_5 - X_2 k_{23} - X_1 k_{01,1}; \quad \beta_7 = \beta_5 + X_1 k_{01,1} + \sum_{i=1}^3 X_i k_{10,i}; \quad \beta_8 = \\ k_{10,1} + 2k_{01,1} - k_{21,1}; \quad \beta_9 = k_{01,2} - k_{21,2}; \quad \beta_{10} = k_{01,2} + k_{10,2}; \quad \beta_{11} = k_{01,1} + k_{10,1}; \quad \beta_{12} = k_{01,1} - k_{21,1} \quad \gamma_1 = \beta_5 d_1, \quad \gamma_2 = X_1 \\ \times (k_{02} d_2 - k_{01} d_1); \quad \gamma_3 = X_1 (k_{32} d_2 + k_{01,2} d_1); \quad \gamma_4 = k_{02}^2 d_2 + k_{01}^2 d_1; \quad \gamma_5 = \beta_3 d_2 + \beta_6 d_1; \quad \gamma_6 = \beta_7 d_1; \quad \gamma_7 = k_{21,1} d_2 - \beta_8 d_1; \quad \gamma_8 = \beta_4 d_2 \\ - \beta_9 d_1; \quad \gamma_9 = k_{32} d_2 + \beta_{10} d_1; \quad \gamma_{10} = k_{21,1} d_2 - \beta_{11} d_1; \quad \gamma_{11} = \beta_{12} d_1; \quad \Delta = d_1 + d_2; \quad d_1 = B_{12} f_1; \quad d_2 = B_{21} f_2; \quad f_2 = \frac{n_{001}}{n_2} \approx 1.0 f_1 \\ = \frac{n_{100}}{n_1} \approx \exp\left(-\frac{\theta_{100}}{T}\right) / \left[\exp\left(-\frac{\theta_{100}}{T}\right) + \exp\left(-\frac{\theta_{010}}{T}\right) + \exp\left(-\frac{\theta_{020}}{T}\right) + \exp\left(-\frac{\theta_{110}}{T}\right) + \exp\left(-\frac{\theta_{030}}{T}\right) \right]; \quad B_{12} = \frac{\lambda^3 B''}{4\pi K T} \\ \times g_{J'} A_{v'J' \rightarrow vJ} \exp\left[-\frac{hCB''J(J+1)}{KT}\right] \cdot \frac{2}{\pi \Delta \nu}; \quad B_{21} = \frac{\lambda^3 B'}{4\pi K T} g_{J'} A_{v'J' \rightarrow vJ} \exp\left[-\frac{hCB'J'(J'+1)}{KT}\right] \cdot \frac{2}{\pi \Delta \nu}; \quad g_{J'} = 2J' + 1; \\ J = 19; \quad J' = 20; \quad B' = 0.3866 \times 10^{-2}; \quad B'' = 0.3897 \times 10^{-2}; \quad A_{v'J' \rightarrow vJ} = \frac{1}{5.38} \quad \lambda = 10.6 \times 10^{-6}; \quad \Delta \nu = N \sum_{i=1}^3 \frac{X_i \sigma_i}{T} \\ \times \sqrt{\frac{8KT}{\pi} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_i} \right)}; \quad \sigma_1 = 1.3 \times 10^{-18}; \quad \sigma_2 = 0.87 \times 10^{-18}; \quad \sigma_3(\text{Ar}) = 0.76 \times 10^{-18}; \quad \sigma_3(\text{He}) = 0.37 \times 10^{-18}$$

注: ① 线宽 $\Delta \nu$ 只考虑均匀加宽。 ② 表里所有参量单位已标准化(即 M. K. S 制)。

(上接第 721 页)

激光器被慢环锁住以后, 误差电压幅值可由图 10 给出, 由腔鉴频率得出激光频率波动约为 $6 \text{ MHz}_{\text{P-P}}$ 。再把快环锁住, 误差电压幅值可由图 11 给出, 由误差电压幅值 400 mV 可算得激光器线宽小于 $300 \text{ kHz}_{\text{P-P}}$ 。

感谢天津电子计算机研究所袁维本、于

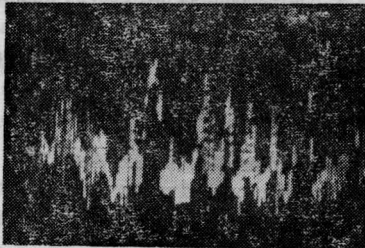


图 10 锁慢环后, 激光器频率涨落

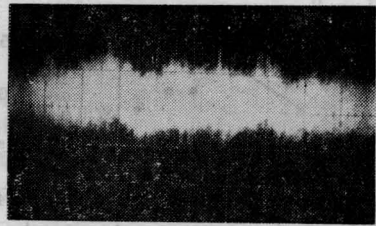


图 11 双环锁定后激光器频率的涨落
洁梅同志及天津激光研究所严松涛、陈仕奇同志的大力协助。

参 考 文 献

- [1] 傅济时;《中国激光》, 1985, 12, No. 8, 510.
- [2] J. Helmcke et al.; Appl. Opt., 1982, 21, No. 9, 1686.