

# 二极管激光泵浦固体激光器和稳频研究\*

林岳明 何慧娟

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术实验室, 上海 201800)

**摘 要** 用调制法布里-珀罗干涉仪方法稳定二极管激光泵浦的 Nd·YVO<sub>4</sub> 单频激光器的频率。在锁定情形下, 激光频从自由运行慢漂移 1.43 MHz/s 和抖动 ±2.5 MHz 分别改善到 75.75 kHz/s 和 ±1 MHz。

**关键词** 二极管激光泵浦, 固体激光器, 稳频。

## 1 引 言

二极管激光泵浦的固体激光器具有高效、小型、紧凑和稳定可靠的特点。它们在光谱、相干光通信、激光雷达和激光倍频等领域有着重要的应用价值。但是泵浦功率的变化、机械振动、环境温度变化及声振动噪声等因素会引起激光器腔长光程的起伏, 导致激光输出频率的变化, 如 1064 nm Nd·YAG 激光器温漂频移达 -3.1 GHz/°C。因此要使激光器成功地应用于上述领域, 必须采取措施阻止激光频率漂移。已有几种方法稳定激光频率如 Pound-Drever 技术<sup>[1]</sup>、偏置锁频<sup>[2]</sup>和利用原子或分子吸收线的绝对稳频<sup>[3]</sup>。本文采用调制法布里-珀罗干涉仪的方法稳定二极管激光泵浦的固体激光频率, 取得激光二极管泵浦的 Nd·YVO<sub>4</sub> 单频激光器频漂从 1.43 MHz/s 改善到 75.75 kHz/s。

## 2 原 理

稳频的基本原理如图1所示, 把激光器看成受噪声  $S_{f, laser}$  干扰、输出频率为  $\nu$  的装置,  $S_{f, laser}$  为激光频率噪声。激光频率由鉴频器产生一个误差信号, 然后通过伺服放大反馈到频率控制器上, 实现频率噪声的抑制。控制环路的关键部分是鉴频器, 本文利用法布里-珀罗作鉴频器, 其原理如下:

法布里-珀罗的功率传输函数为:

$$T_{F-P} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\omega\tau_p)} \quad (1)$$

式中  $R$  为法布里-珀罗干涉仪的端面光强反射率,  $\omega$  为光频率,  $\tau_p$  为光在法布里-珀罗干涉内的穿越时间即  $\tau_p = nL/c$ ,  $c$  为光速,  $n$  和  $L$  分别表示法布里-珀罗中介质折射率和其长度。若在

\* 国家自然科学基金和中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学开放实验室资助课题。

收稿日期: 1995年12月8日

法布里-珀罗干涉仪的一个腔面上粘上压电陶瓷并在压电陶瓷上加一调制电压

$$U = U_0 + \Delta U \cos(\Omega t) \tag{2}$$

式中  $\Omega$  为调制频率,  $\Delta U$  为调制幅度,  $U_0$  为直流偏置。那么干涉仪的长度和穿越时间也将受到调制

$$L = L_0 - \Delta L \cos(\Omega t), \quad \tau = \tau_0 - \Delta \tau \cos(\Omega t) \tag{3}$$

式中  $\Delta L = d_{31}\Delta U$ ,  $d_{31}$  为压电系数,  $\Delta \tau = n\Delta L/c$ 。考虑调制后的  $T_{F-P}$  变为

$$T(\tau) = \frac{4R(1-R)^2\omega\Delta\tau}{[(1-R)^2 + 4R\sin^2(\omega\tau_0)]^2} \sin(2\omega\tau_0) \cos(\Omega t) + T(\tau_0) \tag{4}$$

这样放在干涉仪输出端的光二极管输出信号也具有  $\Omega$  的分量。用一带通滤波器去掉直流部分, 取出  $\Omega$  分量即为

$$U_{er} = K_r I_L \frac{4R(1-R)^2\omega\Delta\tau}{[(1-R)^2 + 4R\sin^2(\omega\tau_0)]^2} \sin(2\omega\tau_0) \cos(\Omega t) \tag{5}$$

式中  $K_r$  为光二极管的光电转换系数,  $I_L$  为入射到干涉仪的激光光强。

经同步检测, 可得到所需的误差信号为

$$U_{er} = K_r I_L U \frac{4R(1-R)^2\omega\Delta\tau}{[(1-R)^2 + 4R\sin^2(\omega\tau_0)]^2} \sin(2\omega\tau_0) \tag{6}$$

式中  $U$  为同步检测参考信号强度。根据(1)式和(6)式可得图2所示的曲线。在确定的实验条件下经同步检测输出的信号只与激光频率有关。如果激光频率变化  $\Delta f$ , 那么同步检测器的输出就按图2(a)曲线一次导数变化即图2(b)。利用这个特性, 把法布里-珀罗干涉仪作为稳频控制环路的频率鉴别器。

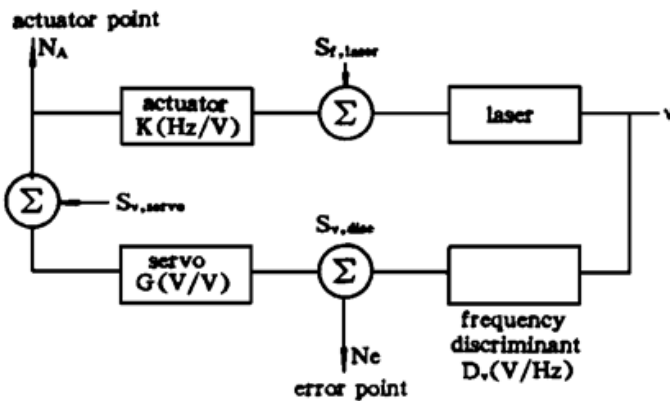


Fig. 1 Schematic diagram of laser frequency stabilization. (PZT flued on the output coupler)

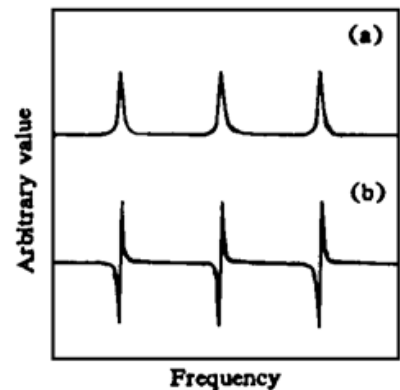


Fig. 2 (a) spectrum of the intensity transmitted by a Fabry-Perot. (b) first derivative of the transmission spectrum

### 3 实 验

在文献[5]的单频激光器基础上, 建立如图3所示的实验装置。输出激光前加一光隔离以阻止反射光对激光器的影响。光隔离器是由1064 nm 四分之一波片和布儒斯特角偏振膜板 ( $T_p = 99\%$ ,  $T_s = 1.5\%$ ) 组成, 瀾波片两面上蒸镀1064 nm 减反膜 ( $R \leq 0.1\%$ )。FP<sub>1</sub> 和 FP<sub>2</sub> 为二个自制的扫描法布里-珀罗干涉仪。FP<sub>1</sub> 用作检测激光器是否处于锁定状态, 其精细度  $\mathcal{F} = 100$ , 自由光谱范围为0.5357 GHz; 另一个 FP<sub>2</sub> 作为稳频控制环路中的光频参考腔, 其精度  $\mathcal{F} = 12.5$ , 自由光谱范围为1.0714 GHz。D<sub>1</sub>和 D<sub>2</sub>为光二极管。锁定为 EG&G Model 5210

锁相放大器，其输出信号经高压放大器反馈到粘在输出耦合腔板上的压电陶瓷上。为获得鉴频信号，利用锁相放大器的内置信号源作调制信号，通过1:1变压器耦合到FP<sub>2</sub>的压电陶瓷上。实验中，使用耦合变压器是为了消除FP<sub>2</sub>直流高压偏置对锁相放大器的影响。

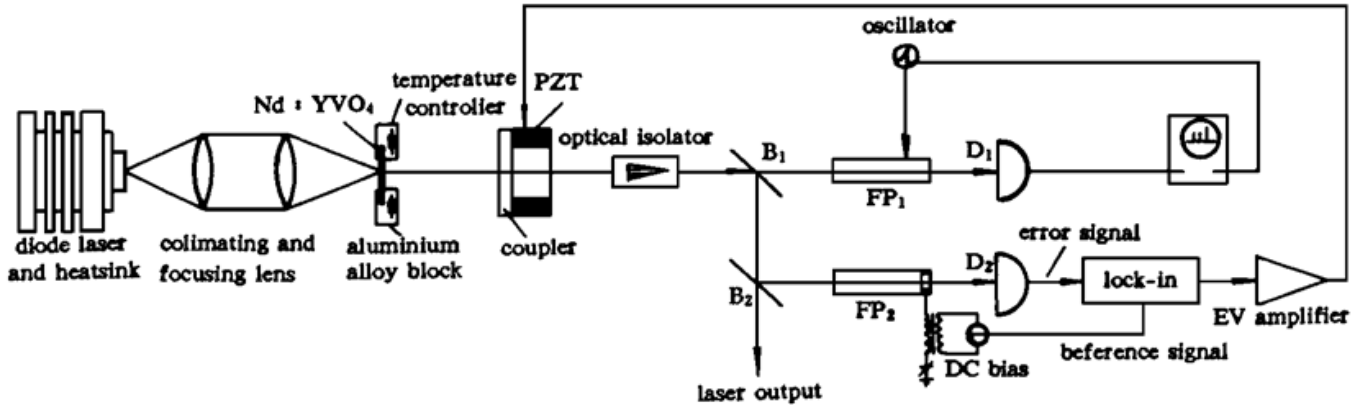


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

实验中用锯齿波扫描激光频率，测量了FP<sub>2</sub>的透射光强的谱分布和鉴频曲线，如图4和图5所示，这些结果完全同图2理论计算结果一致。为了优化控制系统，测量了不同调制频率和幅度下的鉴频曲线。结果表明：在一定调制幅度下存在一个最佳调制频率；在一定的调制频率下调制幅度越大信号越大。这些结果很易理解，对于一定的压电陶瓷和腔镜组成的系统有一个共振频率，当驱动源的频率大于等于共振频率时，压电陶瓷的振动失真。压电陶瓷随电压的变化在一定范围内是线性的。因此对于确定实验系统存在一个最佳的调制频率和幅度。在实验中，调制信号的频率和幅度分别为5 kHz和0.5 V。还测量了不同类型压电陶瓷的频响，如表1所示。

Table 1 The electrical bandwidths of different type of PZT

type	$\Phi 30 \text{ mm (out)} \times \Phi 28 \text{ mm (in)} \times 50 \text{ mm}$ cylindric	$4.4 \text{ mm} \times 4.4 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ multilayer monolithic piezo-actuator
electrical BW	10 kHz modulation amplitude 0.2460V	40 kHz modulation amplitude 1 V

图6所示为锁相放大器输出的误差信号在锁定前后的变化情况，纵坐标为电压，横坐标为时间。也可以用示波器观察控制环路是否锁住的情况，若在锁定情形下改变参考FP<sub>2</sub>的直流偏置，那么可以调谐输出激光频率。表2表示稳频前后的结果，并与常规灯泵的固体激光器作了比较。图7为输出频率移量随时间的变化曲线。

The comparison of the frequency stability between free-running case and locked case of Nd:YVO<sub>4</sub> lasers

measured parameters		diode-laser pumped Nd:YVO <sub>4</sub>	lamp pumped Nd:YAG
free running	jitter	2.5 MHz	30 MHz
	slow drift	1.43 MHz/s	
locked	jitter	1 MHz	
	slow drift	75.75 MHz/s	
	locked time	21 min	

结 论 二极管激光泵浦的固体激光器性能比灯泵的优越，无论频率的慢漂移还是瞬时抖动

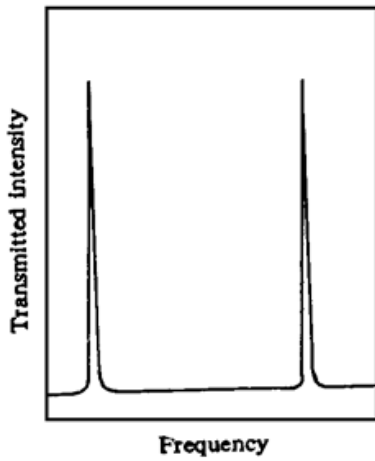


Fig. 4 Experimental Fabry-Perot transmitted intensity vs. the laser frequency. The spacing frequency between two peak is 1.0714 GHz

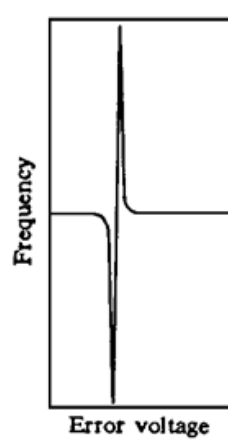


Fig. 5 The error signal shown as a function of laser frequency

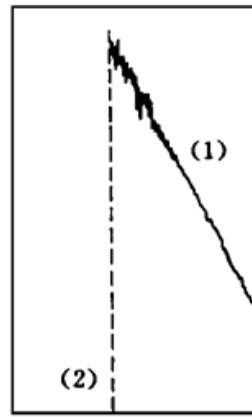


Fig. 6 The typical signal at the output of a lock-in detector obtained in the area between locking case (1) and free running case (2)

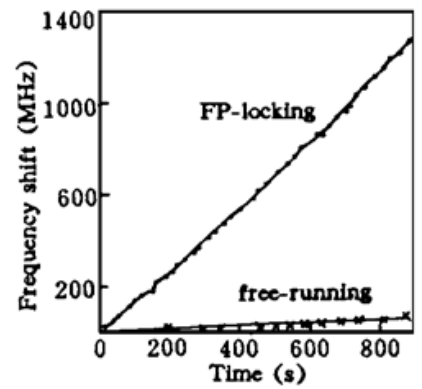


Fig. 7 The frequency shift of diode-laser pumped Nd:YVO<sub>4</sub> versus time

均比灯泵的好。通过外腔主动稳频,可以有效地阻止激光频率的慢漂移。利用调制法布里-珀罗干涉仪的方法把 Nd:YVO<sub>4</sub>单频激光器锁定到干涉仪的参考腔上。激光频率从自由运行慢漂移1.43 MHz/s 和抖动±2.5 MHz, 分别改善到75.75 kHz/s 和±1 MHz。如果更进一步优化设计控制环路的增益频率特性,那么完全可以抑制这些噪声。

### 参 考 文 献

- [1] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*, Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Appl. Phys. (B)*, 1983, **31**(2) ·97~105
- [2] T. J. Kane, Alan C. Nilsson, Robert L. Byer, Frequency stability and offset locking of a laser-diode-pumped Nd:YAG monolithic nonplanar ring oscillator. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3) ·175~177
- [3] Ady Arie, Stephan Schiller, Eric K. Gustafson *et al.*, Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in Molecular iodine. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17) ·1204~1206
- [4] Timothy Day, Eric K. Gustafson, Robert L. Byer, Sub-Hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a fabry-perot interferometer. *IEEE J. Quan. Electron.*, 1992, **QE-28**(4) ·1106~1117
- [5] 林岳明, 何慧娟, 二极管激光泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的频率调谐特性. *光学学报*, 1994, **15**(9) ·1189~1194

## Frequency Stabilization of Diode-Laser Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Lasers

Lin Yueming He Huijuan

(Laboratory of Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 8 December 1995)

**Abstract** We present the results on frequency stabilization of a diode-laser-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser, which is locked to a resonant reference cavity by modulating the reference cavity. In the locking case, a drift rate of 75.75 kHz/s and jitter of approximately ±1 MHz were obtained.

**Key words** diode-laser pumped, solid-state laser, frequency stabilization.