

# 利用自差法研究激光二极管泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的线宽\*

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** 用光纤延时自差法测量二极管激光纵向泵浦单频运转的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的线宽。在 1 秒时间内, 激光线宽为 25 kHz。还测量了线宽与激光器腔长和输出功率的关系。

**关键词** 自差法, 固体激光线宽。

## 1 引 言

单频激光器是近几年来二极管激光泵浦固体激光器的发展方向之一, 它主要应用于光雷达、光通信、引力波测量、高分辨率光谱测量以及量子光学中压缩态研究等等许多领域。目前, 已有许多方法可实现固体激光器线宽小于 10 kHz 的单频工作如环形激光器<sup>[1]</sup>, 微型激光器<sup>[2]</sup> 以及腔内放置 1/4 波片消除空间烧孔效应的扭摆模腔激光器(TWC)<sup>[3, 4]</sup>。精确测量这些线宽以评价激光器的性能显得很有必要。有几个方法可测量二极管激光泵浦的固体激光器线宽<sup>[5, 6]</sup>。最常用的方法是用法布罗-珀罗干涉仪, 但是测量如此窄的线宽, 法布罗-珀罗干涉仪往往分辨率显得不够。拍频法是测量很窄线宽较理想的方法, 结果可靠。它的不足是需要两台激光器而且频率十分接近。本文采用只需一个激光器的延时自差拍频法测量二极管激光泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 单频激光器线宽, 并研究了线宽与激光腔长的关系。

## 2 实验原理

早在 1980 年 Okoshi 提出来的延时自差拍频法目前已广泛应用于半导体激光器线宽的测量<sup>[7, 8]</sup>。原因是作延时用的常用通信光纤在 800 nm、1300 nm 和 1500 nm 三个窗口有极低的传输损耗, 激光可以传输很远的距离以获得较长延时时间, 因而可以测量较窄的线宽。本文考虑到通信用单模光纤在 1064 nm 波长附近损耗不是很大, 而且研制的激光器输出具有一定的功率, 故把该方法应用到 1064 nm 激光的线宽测量。

具体原理如图 1 所示。激光光场通常可表示为

$$E(t) = [A_0 + \epsilon(t)] \exp \{i[\omega_0 t + \phi(t)]\} \quad (1)$$

\* 本工作得到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的支持。

收稿日期: 1995 年 5 月 23 日; 收到修改稿日期: 1995 年 6 月 19 日

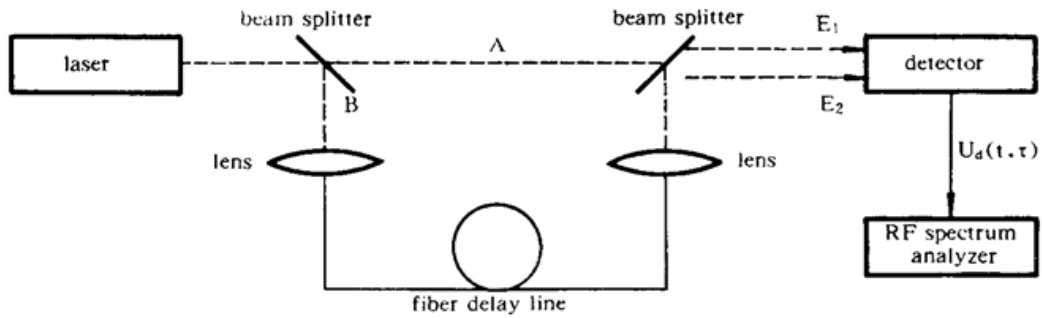


Fig. 1 Measurement method of frequency fluctuation using an optical fiber as a delay line

式中  $A_0$  为平均光场幅度,  $\epsilon(t)$  为光场幅度变化量, 并且  $\epsilon(t) \ll A_0$ 。  $\omega_0$  激光平均频率,  $\phi(t)$  为瞬时相位。从激光器输出的光经分束板分成 A 和 B 二路, A 路直接入射到第二个分束板, B 路通过光纤延时  $\tau$ 。经过第二分束板后, A 路光场  $E_1(t)$  和 B 路延时光场  $E_2(t)$  分别为

$$E_1(t) = A_1 \exp \{i[\omega_0 t + \phi(t)]\}, \quad E_2(t) = A_2 \exp \{i[\omega_0(t - \tau) + \phi(t - \tau)]\} \quad (2)$$

因为  $\epsilon(t) \ll A_0$ , 所以(1)式中忽略  $\epsilon(t)$  项。那么在光接收器处的总光场为

$$E_d = A_1 \exp \{i[\omega_0 t + \phi(t)]\} + A_2 \exp \{i[\omega_0(t - \tau) + \phi(t - \tau)]\} \quad (3)$$

因为光接收器的光电流正比于  $E_d(t)E_d^*(t)$ , 故光接收器的输出用一带通滤波器去掉直流, 取出交变部分即为

$$U_d(t, \tau) = KA_1A_2 \{ \exp(i\omega_0\tau) \exp[i\Delta\phi(t, \tau)] \} + c. c., \quad \Delta f(t, \tau) = \phi(t) - \phi(t - \tau) \quad (4)$$

式中  $K$  为光电转换系数。在实验中  $\tau$  为常数, 因此  $\exp(i\omega_0\tau)$  项不影响傅里叶频谱, 可以忽略。所以光接收器输出正比于  $\exp[i\Delta\phi(t, \tau)]$  的成份, 而不是  $\exp[i\phi(t)]$ , 但如果延时时间  $\tau$  大于激光的相干时间, 即

$$\tau \gg \tau_c \approx \frac{1}{\pi(\Delta\nu)_{\text{laser}}} \quad (5)$$

那么  $\phi(t)$  和  $\phi(t - \tau)$  不相干,  $\phi(t)$  和  $\Delta\phi(t)$  的统计分布规律一样。因而测得  $U_d$  的频谱就可以直接获得激光线宽。

在实验中为了避开频谱分析仪的零频基线提高测量精度, 常常在一光路中引入声光调制器作频移器。

### 3 实验及结果

本文的实验装置如图 2 所示, 二极管激光泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器单频运转部分可参阅文献[9, 10]。光隔离器有 1064 nm 偏振膜板和蒸镀减反膜的 1/4 波片组成。经隔离器的激光分成二部分, 一部分用来检测输出模式情况, 另一部分用来测线宽。共焦扫描干涉仪的自由光谱范围为 0.5357 GHz, 精细度  $\mathcal{F} \approx 100$ 。用  $\times 10$  的普通显微物镜作光纤耦合透镜。频移器声光调制器是由中国科学院上海硅酸盐研究所研制, 工作频率 48 MHz, 驱动电源为 XG22A 型超高频功率信号发生器。延时光纤为单模光纤, 长 3 km。光纤耦合器为 1064 nm 3 dB 耦合器, 损耗小于 0.2 dB。用美国 Tecktronix 495P 频谱分析仪测量光电接收器的信号。

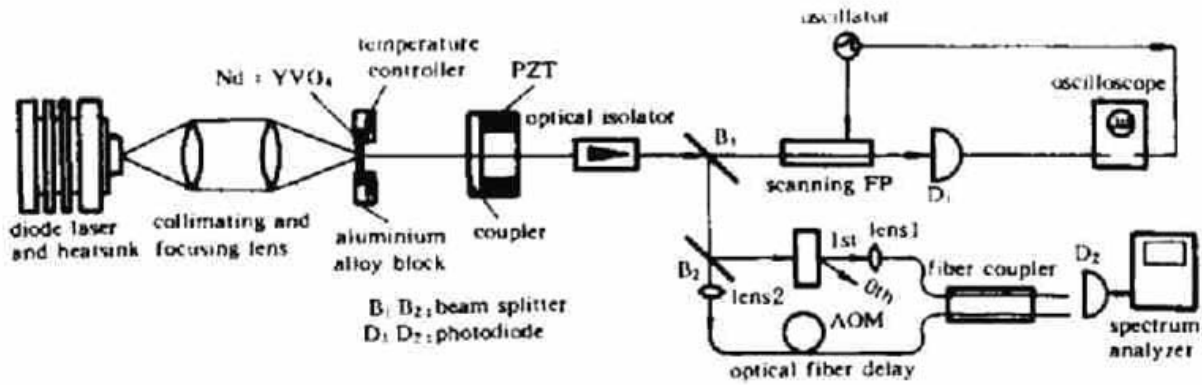


Fig. 2 Experimental arrangement

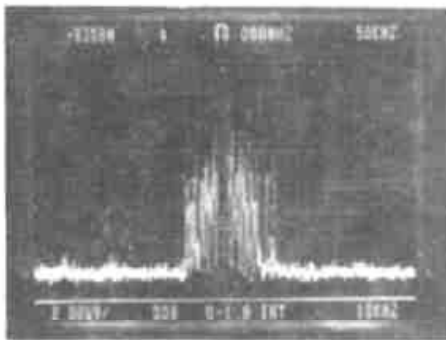


Fig. 3 Self-heterodyne beat spectra displayed on the spectrum analyzer with a resolution bandwidth of 10 kHz. The sweep time is 1 sec.

实验测量了光纤的损耗。为了确保测量结果的可靠性，可以先测最佳耦合时的光纤输出功率，然后离耦合端口几厘米处切断光纤，测得的光纤输出功率，作者认为此时测得的功率即为耦合进入光纤的激光功率。其结果为：SM-10/125 型号光纤，进入光纤功率 1340  $\mu\text{W}$ ，传输后的功率 290  $\mu\text{W}$ ，损耗为 5.8 dB/km。

图 3 表示频谱分析仪带宽分辨率 10 kHz 时观察到的自差拍频谱。激光腔长  $L = 57.48$  mm，二极管工作电流  $I = 1.41$  A。扫描时间为 1 sec 时的频谱，激光线宽为 25 kHz。图 4 表示在一定输出功率  $P_0 = 6$  mW 下不同腔长与线宽的关系。随着光学腔长的增加，线宽变小。

图 5 表示在腔长  $L = 41.76$  mm 下激光输出功率与线宽的关系。功率变大，线宽变窄。这些与理论预言的一致，由文献[11]可知，激光线宽  $\delta f$  满足下式：

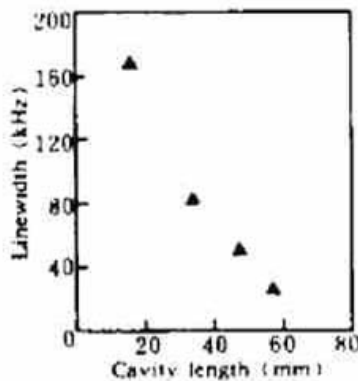


Fig. 4 Measured 3 dB spectral width as a function of laser cavity length. The output power is 6 mW

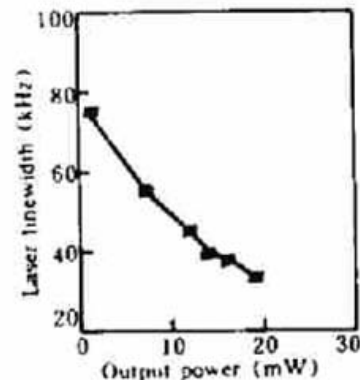


Fig. 5 Measured 3 dB spectral width as a function of laser output power. The cavity length is 41.76 mm

$$\delta f = \frac{2\pi h f (\Delta f)^2}{P_0} \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad (6)$$

式中  $f$  为激光振荡频率， $\Delta f$  为谐振腔线宽， $P_0$  为激光输出功率， $N_2$  和  $N_1$  分别为上下能级的粒

子数。而  $\Delta f$  与腔纵模间隔  $\Delta\nu$  成正比，因此激光线宽与光学腔长成反比。从减小激光线宽来说，腔长越长越好。另外，线宽与激光输出功率  $P_0$  成反比，输出功率越大线宽越小。

**结 论** 用延时自差法测量 1064 nm 激光器的线宽是可行的，尽管光纤有 5.8 dB/km 的损耗。对于本实验的测量系统延时  $\tau = 15 \mu\text{s}$ ，有(6)式可知分辨率可达 21 kHz。若要进一步提高分辨率，就需加长光纤。测得激光二极管泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器在 1 秒时间内线宽 25 kHz。测量的激光线宽与光学腔长关系说明为了获得尽可能窄的激光线宽，腔长越长越好。这些结果与理论预期的一致。据作者所知，用光纤延时自差法测 1064 nm 激光器的线宽在国内外还未见报道。

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所光电子与半导体实验室丁浩博士在实验中指导光纤的使用。

### 参 考 文 献

- [1] Thomas J. Kane, Robert L. Byer, Monolithic unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser. *Opt. Lett.*, 1985, 10(2): 65~67
- [2] J. J. Zayhowski, A. Mooradian, Single-frequency microchip Nd laser. *Opt. Lett.*, 1989, 14(1): 24~26
- [3] K. Wallmeroth, Monolithic integrated Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, 15(16): 903~905
- [4] 林岳明, 何慧娟, 陆雨田, 激光二极管泵浦的单频连续工作的 Nd:YAG 激光器. *光学学报*, 1994, 14(8): 891~893
- [5] Thomas 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
- [6] K.-C. Peng, Ling-An Wu, H. J. Kimble, Frequency-stabilized Nd:YAG laser with high output power. *Appl. Opt.*, 1985, 24(7): 938~940
- [7] T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama, Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum. *Electron. Lett.*, 1980, 16(16): 630~631
- [8] L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger, et al., Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(11): 2070~2074
- [9] 林岳明, 何慧娟, 单频运转的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器. *光学学报*, 1995, 15(3): 371~373
- [10] 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研究. *光学学报*, 1995, 15(9): 1189~1194
- [11] A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics*, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1971, See eq. 10.6~13

## Linewidth Determination from Self-Heterodyne Measurements of Diode-Laser Pumped 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

Lin Yueming He Huijuan

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

(Received 23 May 1995; revised 19 June 1995)

**Abstract** The behavior of the power spectrum of diode-laser pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser has been studied by using a delayed self-heterodyne interferometric technique. The linewidth is 25 kHz in 1 sec. sweep time. The relationship between the linewidth and the cavity length was measured.

**Key words** self-heterodyne, the linewidth of solid state laser.