

2 μm 单纵模激光频率短期不稳定性度的测量

鞠有伦 王振国* 王磊 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用光纤延时自拍法对固体激光器输出激光频率的短期不稳定性度进行了测量。Tm, Ho:YLF 微片激光器具有毫瓦量级的单纵模、窄线宽的输出, 实验测量了光纤延时长度为 500 m 下, 积分时间为 2 ms, 4 ms, 40 ms, 100 ms 的拍频信号。利用自拍频法获得了光纤延时长度为 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 对应的时间延时长度为 0.5 μs , 1 μs , 1.5 μs , 2 μs , 2.5 μs 下的输出激光的自拍频信号, 得出单频激光器的频率不稳定性度为 1.48 kHz/ μs 。最后对激光频率不稳定性度与激光线宽的关系进行了讨论。

关键词 光学测量; 微片激光器; 短期不稳定性度; 自拍法; 单纵模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2164

Short-Term Frequency Instability Measurement of 2 μm Single longitudinal-Mode Laser

Ju Youlun Wang Zhenguo Wang Lei Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The short-term frequency instability of the solid-state laser was measured by using the self-beat of fiber-delay method. The Tm, Ho:YLF microchip laser which was cooled by liquid nitrogen provided with single longitudinal-mode, narrow linewidth output and the power was up to milliwatt. In experiment, at the fixed fiber length of 500 m, self-beat signals of the laser under the integral time about 2ms, 4ms, 40ms, 100ms were obtained. And under different fiber lengths about 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, the corresponding time delay is 0.5 μs , 1 μs , 1.5 μs , 2 μs , 2.5 μs , and the self-beat signal of the laser was achieved. The short-term frequency instability of Tm, Ho:YLF microchip laser is 1.48 kHz/ μs . Meanwhile the relationship between laser frequency stability and laser linewidth is discussed.

Key words optical measurement; microchip laser; short-term stability; self-beat; single longitudinal mode

1 引 言

激光具有良好的单色性和高能量密度, 在精密干涉测量、光频标、激光通信、激光陀螺、激光雷达等领域中得到了广泛的应用^[1~3]。在众多应用领域之中, 激光频率稳定度及激光线宽是激光器一个非常重要的指标参数。2 μm 固体激光器在激光雷达上的应用成为热点, 雷达光源的频率短期不稳定性度直接影响到雷达的测量精度, 所以测量 2 μm 激光输出短期不稳定性度具有重要的意义^[4]。

在国外很早就用光外差的方法对激光的频率稳定度及线宽进行了研究^[5,6]。L. E. Richter 等^[7]提出当延时时间大于 6 倍激光相干时间时, 可得到准确的洛伦兹线型。2000 年, Jun Izawa 等^[8]首次报道了利用光纤延时自拍频法对 2 μm 输出的 Tm, Ho:YLF 激光器的短期不稳定性度进行测量, 实验中采用 300 m 的光纤, 延时 1.5 μs 。2001 年日本的 C. Nagasawa 等^[9]研究了 Tm, Ho:YLF 微片激光器光纤延时长短对测量结果的影响, 测量得到线性关系。在国内, 余

收稿日期: 2008-03-17; 收到修改稿日期: 2008-04-21

作者简介: 鞠有伦(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光器、光学参变振荡器等方面的研究。

E-mail: juy@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangzhenguo_82@163.com

本立等^[10,11]在利用光纤延时自拍测量激光线宽过程中,得到了 0.5 kHz 的激光线宽。

本文报道了利用光纤延时自拍法测量激光短期不稳定度,测量了 Tm, Ho: YLF 微片激光器单纵模输出频率不稳定度为 1.48 kHz/μs 的测量结果,并对激光频率不稳定与激光线宽的关系进行了讨论。

2 原 理

被测激光束经分束器分为两束,一束通过一根长的单模光纤,其长度可自行选择,另一束经过一根短光纤(约 1 m),再利用合束器对两束光进行合束,使其同时入射到探测器的面源上。可通过示波器或频谱分析仪来观测探测器输出的拍频信号以及傅里叶

变换后的频谱图。

采用自相关函数和光电流的谱密度函数描述输出频率与能量谱密度的关系^[7]。

单模激光可认为是一个有相位扰动振幅稳定的准单色电磁场,应用相干的理论,探测器上的总电场为两路光的电场合成:

$$E_d = \sqrt{P_0} \cos[\omega_0 t + \phi(t)] + \sqrt{P_0} \cos[(\omega_0 + \Omega) \cdot (t - \tau) + \phi(t - \tau)], \quad (1)$$

式中 P_0 为激光器的输出功率, ω_0 为激光的角频率, τ 为光纤的延迟时间, Ω 为激光的频率波动, ϕ 为相位随时间的变化函数,代表了相位的随机波动。探测器上得到的功率谱密度为

$$S(\omega, \tau) = \frac{P_0^2 \tau_c / 2}{1 + (\omega \pm \Omega)^2 \tau_c^2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_c}\right) \left[\cos(\omega \pm \Omega) |\tau| + \frac{\sin(\omega \pm \Omega) |\tau|}{(\omega \pm \Omega) \tau_c} \right] \right\} + \frac{1}{2} P_0^2 \pi \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_c}\right) \delta(\omega \pm \Omega), \quad (2)$$

式中 τ_c 为激光的相干时间, ω 为拍频信号频率。由(2)式可见,当光纤延时时间较短时,能量主要体现在表征相干特性的第二项 δ 函数上,而随着延时时间的变长,光能量向表征洛伦兹线宽特性的第一项转移,当延时时间足够长时, δ 已经基本上不会对洛伦兹线型构成影响。随着延时时间的变长, δ 函数影响逐渐变小,线宽信号上的附加波动也逐渐消失,逐渐展现为准洛伦兹线型。当延时至三十倍相干时间或者更长时间时,相干性几乎不存在,所出现的信号为洛伦兹线型的信号,其宽度为激光线宽的两倍。

3 实验装置

2 μm Tm, Ho: YLF 激光器自拍测量的实验装置如图1所示。微片激光器中采用双端镀膜的 Tm, Ho: YLF 晶体,晶体外形尺寸为 3 mm×3 mm×0.9 mm。利用晶体固有的平行平面形成了自准直的 2 μm 纵向

抽运平腔微片激光器,并在短腔的条件下获得激光器的单纵模输出。同时液氮温度下,使激光器工作于真空环境,受外界干扰小,容易获得单纵模稳频的激光输出。采用光纤延时自拍法测量激光输出短期频率不稳定度。光纤延长度分别为 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m。

2 μm 输出激光经透镜准直及分束片后,进入到光纤耦合器,再经 80/20 分束器把激光分为两束,其中一束经光纤延迟后与另一束经 60/40 合束器合束后打到探测器上。选用的是快响应的 InGaAs 光电探测器,其响应波长范围是 1.15~2.32 μm,响应时间小于 5 ns。通过示波器观察,进行快速傅里叶变换可得到信号的频域图形,也可利用频谱分析仪直接得到信号的频谱分布图形。由于频谱仪的带宽响应特性,必须利用移频器将频差扩大才能对信号进行分析,所以仅利用示波器对信号进行了处理。

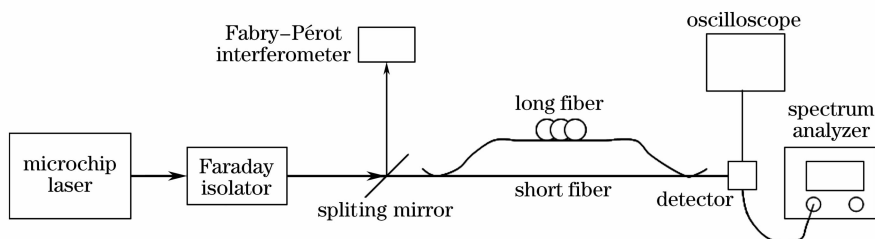


图 1 稳定性测量实验装置图

Fig. 1 Experimental device of stability measurement

4 测量结果与分析

在实验测量中,光纤延时时间决定了频率不稳定度的观察时间,而积分时间则决定了能否将光纤延时时间内频谱的变化充分体现出来。如果积分时间很短,光纤延时前后激光输出频率漂移是一个相对的稳定值,则可以得到相对好的信号,但不能充分说明延时时间内的频率不稳定度。只有积分时间足够长时才能将频率不稳定度充分体现出来。但受到示波器快速傅里叶变换的限制,如果观察时间太长,无法准确得到较高频率的信号,频域信号已与观察时间的累积所成的趋势不同。

图 2(a)~图 2(d)分别为 500 m 光纤延时下,积

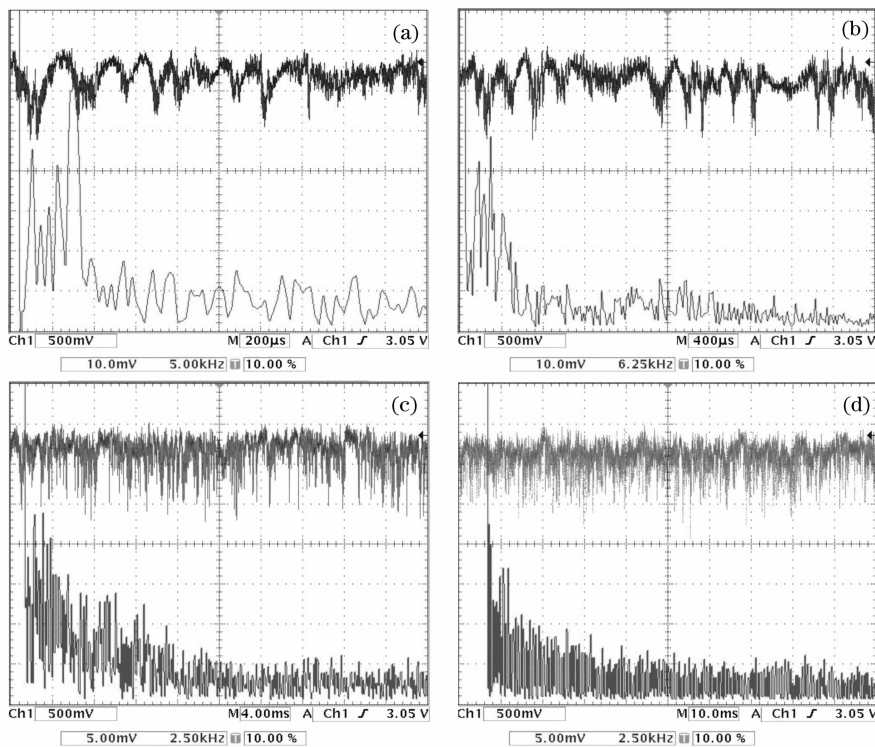


图 2 积分时间 2 ms (a), 4 ms (b), 40 ms (c), 100 ms (d)时的拍频信号

Fig. 2 Beat frequency signals with integral time of 2 ms (a), 4 ms (b), 40 ms (c), 100 ms (d)

在图 2 中还可看到一些高频信号,一部分来自于与光信号无关的探测器或者中频放大电路的固有噪声,另一部分是与光信号有关的,为固体激光器固有的弛豫波动。

图 3(a)~图 3(d)分别为光纤延时长度为 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m 时的拍频信号,图 4 为激光输出频率不稳定度随延时时间的变化关系。从图中可见,当光纤长度分别为 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m 时,对应的时间延时长度为 0.5 μ s, 1.0 μ s, 1.5 μ s, 2.0 μ s, 2.5 μ s, 所得到的激光输出频率不稳定度分别为 1.5 kHz, 2.6 kHz, 3.25 kHz, 3.

分时间 2 ms, 4 ms, 40 ms, 100 ms 时的自拍频信号。从时域中可清晰地分辨出两者拍频后产生的余弦信号及其变化,信号的频率便是两拍频光的频率之差,即光纤延时时间内频率漂移。频域最左端为零频直流信号。从频域可见,频率漂移的分布情况,但并没有明显的特征,极大值出现在 7 kHz 左右。同时可见,随着积分时间的延长,频率不稳定度表现的包络逐渐明显,并且最高值向靠近零频的方向移动,宽度有降低的趋势,从图 2(d)可更加明显地看到这种趋势。如果积分时间更长,不稳定度的包络信号会更清晰,也更真实。

5 kHz, 4.75 kHz, 频率不稳定度是按 1.48 kHz/ μ s 变化的。

本文测量结果与文献[9]的测量结果相似,但表现出一定的浮动性,是由于测量过程中,环境的实时变化导致激光器的频率不稳定性变化。同时观察到,如果积分时间提高到 100 ms,不同光纤延时的测量信号均表现出信号向零频方向集中。

利用光纤延时自拍法测量激光频率短期不稳定度及激光线宽使用的方法、仪器设备,甚至处理数据的过程都是大致相同的,但最后所定义的结果不同,一个是激光输出的频率不稳定度,一个是激光输出线

宽。目前还没有看到从实际测量角度上对两个概念的严格区分。

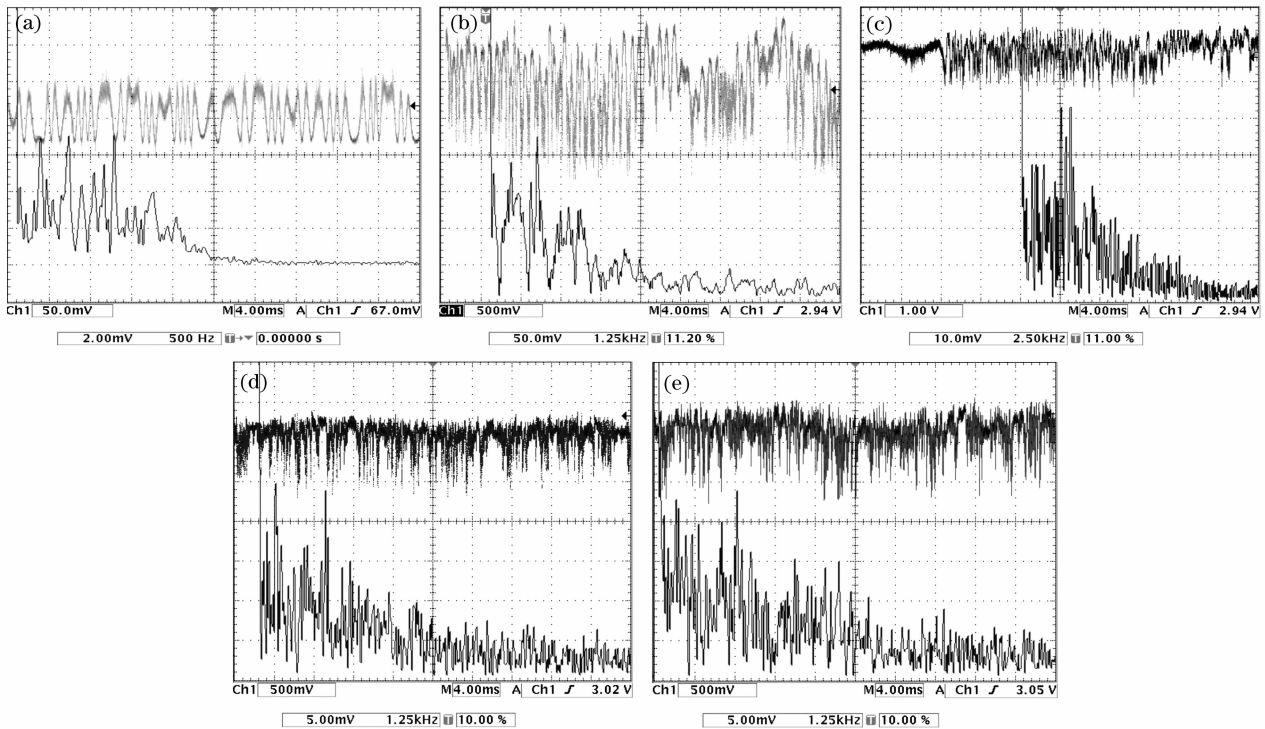


图 3 光纤延时长度为 100 m (a), 200 m (b), 300 m (c), 400 m (d), 500 m (e) 时的拍频信号

Fig. 3 Beat frequency signals with optical fiber delay length of 100 m (a), 200 m (b), 300 m (c), 400 m (d), 500 m (e)

激光线宽极限取决于自发发射的辐射,自发发射与谐振腔已存在的波混合,引起相位波动。谐振腔中的光子对应同相位波,但自发辐射除外,自发发射具有相同的频率,但相位是不规则的,这种相位波动引起有限的激光线宽^[12]。在实际中,激光线宽取决于使频率快速改变的温度变化、机械振动和不稳定性。激光还会表现出长时漂移。如果观察时间接近于零,激光输出为线宽极限,几乎可认为是单频。随着观察时间的增加,一些快变化因素导致激光输出中心频率变化,因此观察时间较长时,线宽会随之变化,观察时间足够长时,一些快变化因素受到抑制,逐渐稳定,激光输出的线宽也就不再变化。

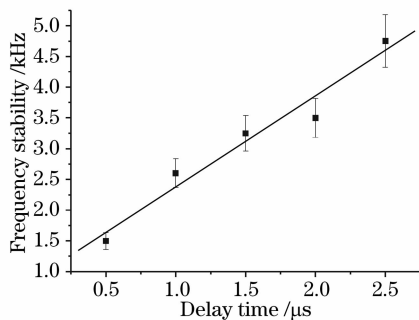


图 4 频率稳定度随延迟时间的波动

Fig. 4 Frequency stability versus delay time

因此定义一个临界观察时间 τ_0 ,短期稳定度就是描述了 τ_0 内快变化因素引起的激光每一个瞬间输出的线宽极限频谱分布的中心频率漂移,线宽描述的是 τ_0 内激光输出的所有频谱信息,出现概率最高的频率即为中心频率。随着观察时间进一步增加,观察时间为 τ_0 的若干倍时,在快变化的基础上会出现慢变化,表现为每一个 τ_0 时间内激光输出频谱的中心频率的漂移。 τ_0 为一倍或者几倍的相干时间。

5 结 论

利用光纤延时自拍法测量了 Tm, Ho: YLF 微片固体激光器的单纵模输出频率不稳定度,在不同的积分时间及不同的光纤延时长度下,分别测量了激光输出的自拍频信号及频率不稳定度。 Tm, Ho: YLF 微片固体激光器在液氮工作温度下,其频率不稳定度为 $1.48\ \text{kHz}/\mu\text{s}$ 。讨论了激光频率不稳定与激光线宽的关系,定义了一个临界观察时间以区分实验测量中短期不稳定度和线宽的区别与联系。

参 考 文 献

- Gao Yukai, Lin Yurong, Deng Zhenglong. A method for improving the performance of ring laser gyro by injecting the multi-cycles step noise with white noise[J]. *Chin. J. Lasers*,

- 2007, **34**(4): 481~484
高玉凯, 林玉荣, 邓正隆. 改善激光陀螺输出特性的随机噪声注入方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 481~484
- 2 Liu Liren. Laser communications in space I: Optical link and terminal technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 1~18
刘立人. 卫星激光通信: I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 1~18
- 3 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Hu Shunxing *et al.*. Design of beam-splitting optical path for differential absorption air pollution monitoring lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 957~961
赵培涛, 张寅超, 胡顺星等. 差分吸收测污激光雷达光路分束设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 957~961
- 4 Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202
王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1198~1202
- 5 Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Development of doppler wind lidar[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(3): 161~168
周小林, 孙东松, 钟志庆. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(3): 161~168
- 6 T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 630~631
- 7 L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2070~2074
- 8 Jun Izawa, Hayato Nakajima, Hiroshi Hara *et al.*. Comparison of lasing performance of Tm:Ho:YLF lasers by use of single and double cavities[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 2418~2421
- 9 C. Nagasawa, T. Suzuki, H. Nakajima *et al.*. Characteristics of single longitudinal mode oscillation of the 2 μm Tm, Ho:YLF microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**: 315~319
- 10 Yu Liben, Qian Jingren, Luo Jiatong. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(4): 345~348
俞本立, 钱景仁, 罗家童. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(4): 345~348
- 11 Yu Liben, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**(4): 351~354
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. 中国激光, 2001, **28**(4): 351~354
- 12 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2002
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002