

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1040-04

被动锁模钛宝石激光器时序紊乱度的测量及控制

赵会娟¹⁾²⁾ 刘子安²⁾ 潘犀灵²⁾

(1), 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)
(2), 台湾交通大学光电工程研究所, 新竹

摘要 : 在实验研究的基础上提出了一套完整地用于测量被动锁模钛宝石激光器时序紊乱度的方案, 即: 对于具有较小的时序紊乱度的激光器系统, 频域法是主要的测量方法, 对时序紊乱度较大的激光器系统的测量, 频域法不再适合, 而使用同步扫描相机的时域法具有更加精确的优点。采用腔长调变的方法对被动锁模钛宝石激光器的时序紊乱度进行了控制, 使时序紊乱度由 6.60 ps 降低到 0.47 ps。

关键词 : 被动锁模钛宝石激光器; 时序紊乱度; 同步扫描相机

中图分类号 : TN248.1 文献标识码 : A

1 引 言

时序紊乱度是被动锁模激光器的一个重要特性, 研究时序紊乱度对光通信、时间分辨光谱研究、光电取样、光波形取样、载子动态特性及电磁瞬时效应等研究都具有重要意义。

所谓激光脉冲的时序紊乱(timing jitter, 以下简称时序紊乱度)是指激光脉冲相位的起伏, 简单地说就是光脉冲重复时间(周期)不一致。

被动锁模钛宝石激光器的时序紊乱度的成因大致为以下三项: 1) 激发源的不稳定; 2) 激光器增益介质的自发辐射; 3) 激光器共振腔的扰动, 引起激光器共振腔扰动的的原因主要是外界环境的影响, 如温度的变化带来的腔长的热胀冷缩、震动等声波对腔体的调变等。

近年来对时序紊乱度的研究受到愈来愈多的重视^[1~5]。目前的研究主要集中在两方面: 1) 时序紊乱度的测量; 2) 降低时序紊乱度的方法^[6,7]。目前时序紊乱度的测量大多采用频域法, 但由于频域法的基础是假设所要测量的激光器具有较小的时序紊乱度, 因此其应用受到了很大的限制, 寻找其它合适的方法成为研究的重点。本文在实验研究的基础上提出了一套测量被动锁模钛宝石激光器时序紊乱度的方法, 并采用腔长调变的方法对时序紊乱进行了控制。以下为了区分起见, 把未经时序紊乱度控制的被动锁模钛宝石激光器简称为自由运转激光器, 把经时序紊乱度控制的简称为控制后的激光器。

2 自由运转激光器时序紊乱度的测量

频域法的测量基础大体如下:

实际光脉冲和理想光脉冲相位的均方根偏差即时序紊乱度可表示为

$$\sigma_j = \frac{1}{f_0} \left[\int_{\omega_L}^{\omega_H} P_j(\omega) d\omega \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中 P_j 为相位噪声的功率频谱, f_0 为激光脉冲的重复频率, ω_H 、 ω_L 分别为噪声功率频谱分布的上、下范围。为求得 P_j , 把实际激光脉冲的强度表示为

$$F(t) = F_0(t) + A(t) + J(t). \quad (2)$$

$F_0(t)$ 为理想的光脉冲的强度, $A(t)$ 、 $J(t)$ 分别为振幅噪声、相位噪声的强度。 $F(t)$ 的功率频谱为^[7]

$$F(\omega) = C_1 f_0^2 \times \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} [\delta(\omega_n) + P_A(\omega_n) + (2n\pi)^2 P_J(\omega_n)] f(t) \quad (3)$$

其中对某一激光器 C_1 为常数, P_A 为振幅噪声功率密度, n 为 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整数, $\omega_n = \omega - 2n\pi f_0$, ω 为角频率。上式表明, 实际光脉冲的功率频谱是由一连串以 ω_n 为中心频率、间隔为 $\Delta\omega = 2\pi f_0$ 的谐波频带所组成, 每一个谐频带又由三部分组成, 第一部分对应没有任何噪声的理想的光脉冲频谱, 为 δ 函数, 第二、第三部分是噪声功率频谱, 分别由振幅噪声、相位噪声所贡献。在某一个谐频的噪声频谱中, 相位噪声所贡献的功率频谱与谐频阶数的平方成正比, 零阶谐频的噪声功率频谱只由振幅噪声组成, 因此可以通过测量高阶谐频的噪声功率频谱, 相对精确地得到相位噪声功率频谱, 即

$$P_f(\omega) = \frac{P_n(\omega_n) - P_n(\omega_0)}{C_1(2\pi n f_0)^2}, \quad (4)$$

其中 $P_n(\omega_n)$ 、 $P_n(\omega_0)$ 分别代表第 n 、0 阶噪声功率频谱密度, 则时序紊乱度为

$$\sigma_j = \frac{1}{f_0} \left[\int_{\omega_L}^{\omega_H} P_f(\omega) d\omega \right]^{1/2} = \frac{1}{C_1(2\pi n f_0)^2 f_0^2} \left\{ \int_{\omega_L}^{\omega_H} [P_n(\omega_n) - P_n(\omega_0)] d\omega \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

我们用频域法对自由运转的被动锁模钛宝石激光器的时序紊乱度进行了测量, 实验方法如图 1 的 A 部分, 由氩离子激光器抽运的具有饱和布拉格反射体的钛宝石激光器所产生的超短光脉冲宽度约为 90 fs, 重复频率约为 82 MHz。快速光电探测器把激光脉冲转换为电脉冲, 此信号送入频谱分析仪后得到功率频谱, 计算机通过 GPIB 控制数据接口分别取出零阶及第 12 阶单边噪声功率频谱, 通过 (5) 式计算出时序紊乱度。实验时应采取措施以减小周围环境如震动等对测量结果的影响。

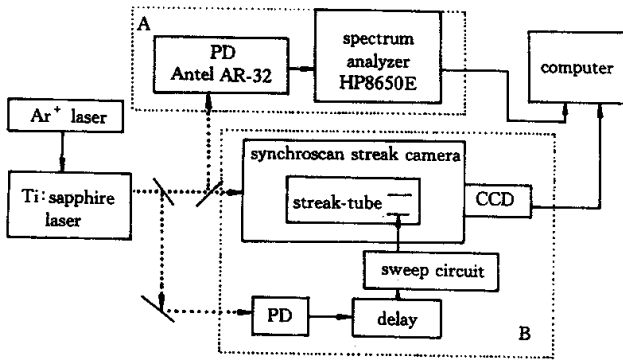


Fig.1 Experimental setup for timing jitter measurement (PD : fast Photo-Detector)

图 2 是用频谱法测量并用 (4) 式计算得的相位噪声功率频谱, 测量范围 ($\omega_L/2\pi \sim \omega_H/2\pi$) 为 100 Hz ~ 5 KHz, 由此计算得时序紊乱度为 18 ps。

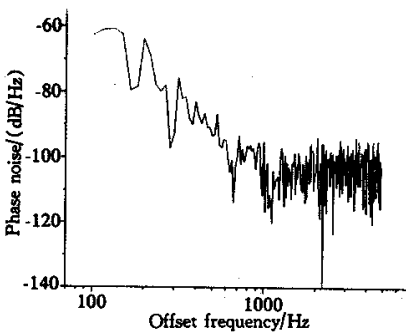


Fig.2 Phase noise of free running passively mode-locked Ti:sapphire laser measured by frequency domain method

实验显示, 高阶频谱在频谱仪上的漂移使测量结果具有很大的分散性。其原因是: 由于频域法在测量时分别取零阶及高次谐频的数据, 测量过程约需 1 分钟的时间, 但因为自由运转激光器的长时间稳定性差, 谐频阶数愈高, 该阶频谱在频谱仪上相对于零阶频谱的漂移愈严重, 而时序紊乱度取自高阶噪声功率频谱和零阶噪声功率频谱的差, 因此频谱的漂移将严重影响计算结果。

为了减小测量误差, 可以采取以下两种途径:

1) 选择高阶频谱和零阶频谱具有尽量小的漂

移时测量, 图 3 是在同样的激光状况及环境条件下, 当 12 阶频谱和零阶频谱具有尽量小的漂移时得到的结果, 由此计算得时序紊乱度为 6 ps;

2) 当被测量系统的振幅噪声很小以及频谱仪的上限频率足够大时, 则可以取尽量高阶的谐频, 近似地认为此高阶谐频的噪声功率频谱基本由相位噪声功率频谱所组成, 从而略去与零阶频谱相减的过程, 也可以得到比较准确的结果。上述第一种方法在实验中是很难达到的, 第二种方案对仪器的要求较高, 加之需先行计算振幅噪声, 显然是不方便的。加之振幅噪声主要来自于抽运源的不稳定, 所以对

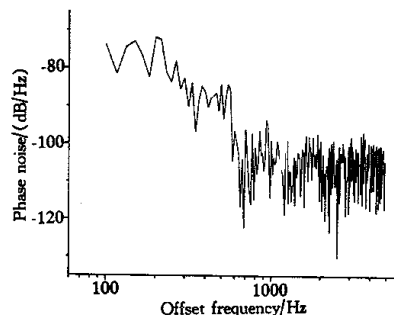


Fig.3 Phase noise of free running laser measured by frequency domain method when the drift between 12th and zero order harmonic is smaller

于气体激光器抽运的被动锁模钛宝石激光器,其振幅噪声是不可忽略的。因此频域法对自由运转的激光器的测量存在着较大的误差。

我们知道同步扫描相机是一种测量超快时间的直观工具。同步扫描相机采用多次重复扫描、图像叠加的方法得到测量结果。我们试图用同步扫描相机测量时序紊乱度,测量框图如图 1B 的部分,入射光被分为两束,一束作为探测光送入扫描管的光电阴极转换为光电子脉冲,另一束作为触发光送入光电转换器。光电转换器输出的电信号经延迟后送入扫描电路,用于产生重复频率等于激光脉冲重复频率 f_0 的斜波电压,该电压对通过扫描管偏转板的光电子进行扫描使之偏转,这些依次被偏转的光电子到达荧光屏后转换为可见光条纹图像。设 CCD 图像卡拾取一幅图像的时间为 $1/F$ 秒,则由 CCD 得到的图像是 f_0/F 个单个脉冲图像的叠加,因此,此图像不仅包含了脉冲宽度的信息而且包含了时序紊乱度的信息。

测得的脉冲的半高宽(FWHM)^[9]

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{cam}}^2 + \sigma_{\text{jitter}}^2 + \sigma_{\text{sys}}^2 + \sigma_{\text{laser}}^2}, \quad (6)$$

其中 σ_{jitter} 为激光的时序紊乱度, σ_{cam} 为同步扫描相机的时间分辨率, σ_{sys} 为同步扫描相机系统的噪声,如触发跳动等带来的噪声, σ_{laser} 为激光脉冲半高宽。对于时序紊乱度较大的系统 σ_{laser}^2 和 σ_{sys}^2 远小于 σ_{cam}^2 和 σ_{jitter}^2 , 上式简化为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{cam}}^2 + \sigma_{\text{jitter}}^2}. \quad (7)$$

由于已知同步扫描相机的时间分辨率,可用上式计算得到时序紊乱度。我们所用的同步扫描相机的 CCD 图像卡截取一幅图像的时间为 $1/25$ s,即该同步扫描相机可以测量 25 Hz 以上的噪声带来的时序紊乱度,因此可以测量到比频域法更低频的噪声。

用同步扫描相机得到的测量结果如图 4 所示,

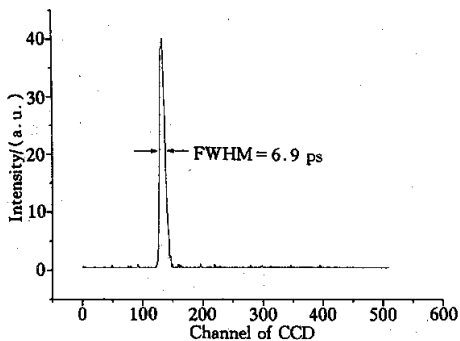


Fig.4 The result of free running laser gotten by synchro-scan streak camrea

波形的半高宽为 6.9 ps,该同步扫描相机的时间分辨率为 2 ps,由(7)式计算得时序紊乱度为 6.6 ps。这一结果与图 3 的计算结果相吻合。

在比较了频域法和同步扫描相机法后,我们不难得出结论:对时序紊乱较大的激光器的测量,频域法的结果相当不准确,相对而言,采用同步扫描相机的方法具有更准确、直观的优点。

3 时序紊乱度的控制

图 5 是我们用腔长调变方法减小时序紊乱度的原理框图。

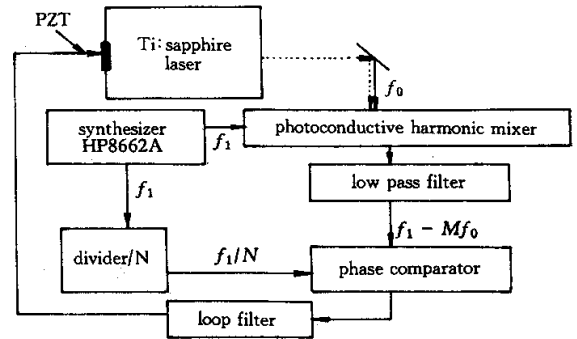


Fig.5 Block diagram of timing jitter controlling by actively adjusting the laser cavity length (PZT is pasted on one of the end mirror of the laser)

光电谐波混频器探测到激光脉冲的谐频 f_0 并使之与信号合成器的频率 f_1 进行混频,低通滤波器检出激光脉冲的第 M 阶谐频(M 为欲控制的谐频的阶数,本实验中取 $M = 12$)与 f_1 的差,选择适当的除频器倍数 N ,使 $f_1/N = f_1 - Mf_0$,则相位侦测器输出为零,压电晶体(PZT)不动作。当某种原因使激光器的腔长(频率)发生变化时, f_1/N 不再等于 $f_1 - Mf_0$,此时相位侦测器将输出和这一变化成正比的电压,驱动压电晶体震动,从而补偿掉腔长的变化,达到稳频即减小时序紊乱度的目的。

图 6 是用频域方法测量的控制后的相位噪声,计算得时序紊乱度为 0.47 ps。对控制后的激光器用频域法进行测量时,由于腔长调变的方法主要控制了激光器的长时间稳定性,因此高阶频谱在频谱仪上几乎没有漂移,所得结果相当稳定。而对于同步扫描相机法,由于此时时序紊乱度达到了和同步扫描相机系统噪声相比拟的程度,所得结果将不再精确。因此对于时序紊乱度较小的激光器的测量,有效的测量方法为频域法。

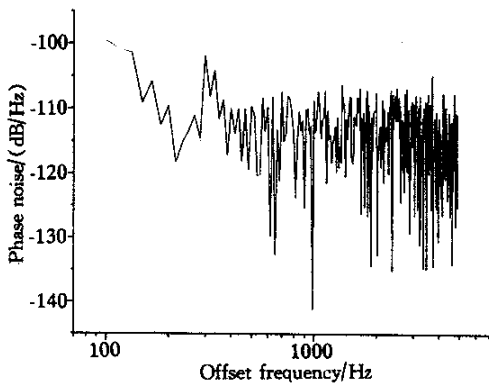


Fig.6 Phase noise measured by frequency domain method after the laser cavity length is controlled

结论及讨论 本文总结了一套测量时序紊乱度的方法,即对时序紊乱度较大的激光器的测量采用同步扫描相机方法准确而且直观,且可测量较低频率的噪声,频域法由于其结果强烈地受限于激光器的长时间稳定性,因此不适合于测量自由运转的激光器,但对时序紊乱度小的激光器,频域法目前仍不失为一种准确的测量方法。受到频谱仪频带宽度及其分辨率的限制,频谱法一般只能测量大于 100 Hz 的噪声,而报道显示小于 100 Hz 的噪声也是相当可观的,因此发展时域法来直接测量小的时序紊乱度是相当必要的。腔长调变法是一种有效的降低被动锁模钛宝石激光器时序紊乱度的方法,由于受到所使用的信号合成器的最高输出频率的限制,我们目前只控制到第 12 倍谐频,此时使时序紊乱度由 6.6 ps

降低到 0.47 ps。在采用其它方法对更高的谐频进行控制后,会使时序紊乱度进一步降低。

参 考 文 献

- [1] Spence D E, Evans J M, Sleat W E *et al.*. Regeneration initiated self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(22):1762~1764
- [2] Son J, Rudd J V, Whitaker J F. Noise characterization of a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(10):733~735
- [3] Spence D E, Sleat W E, Evans J M *et al.*. Time synchronization measurements between two self-mode-locked Ti:sapphire lasers. *Opt. Commun.*, 1993, **101**(1):286~289
- [4] Crocker S A, Betz F D, Levy J *et al.*. Femtosecond synchronization of two passively mode-locked Ti:sapphire lasers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(6):2068~2071
- [5] Anoyama M, Yamakawa K. Noise characterization of an all-self-solid state mirror-dispersion-controlled 10 fs Ti:sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(8):255~258
- [6] Shieh J M, Liu S C, Pan C L. Characterization and reduction of phase noise in passively mode-locked Ti:sapphire lasers with intracavity saturable absorbers. *J. Opt. Soc. Am. (B)* 1998, **15**(6):1802~1807
- [7] von der Linde D. Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers. *Appl. Phys. (B)*, 1986, **39**(1):201~217
- [8] Yang Qinlao, Zhao Huijuan, Niu Hanben. An universal streak camera. *Proc. SPIE*, 1996, **2869**:173~178
- [9] Wu H H, Chang C S, Pan C L. Optoelectronic phase-locking of microwave signals up to 18 GHz by a laser-diode-based GaAs:Cr photoconductive harmonic mixer. *IEEE Microwave Guide. Wave Lett.*, 1992, **2**(1):11~13

Measurement and Controlling of the Timing Jitter of Passive Mode-Locked Ti:Sapphire Laser

Zhao Huijuan¹⁾²⁾ Liu Tzean²⁾ Pan Ciling²⁾

(1), Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(2), Institute of Electro-Optical Engineering, Chiao Tung University, Hsinchu, Taipei

(Received 8 May 2000; revised 23 October 2000)

Abstract: The methods for completely measuring the timing jitter of passively mode-locked Ti:sapphire laser are proposed. It is demonstrated that for the laser system with smaller timing jitter, frequency domain measurement is the major method, whereas for the system with larger timing jitter, frequency domain measurement is not suitable. Instead of that the method of using synchroscan streak camera is more precise. With the technique of actively cavity length controlling, the timing jitter of passively mode-locked Ti:sapphire laser has been reduced from 6.6 ps (before controlling) to 0.47 ps.

Key words: passively mode-locked Ti:sapphire laser; timing jitter; synchroscan streak camera