

# 利用锁相环和 TV-Rb 钟控制飞秒激光 脉冲的载波包络相移\*

韩海年<sup>1)</sup> 张 炜<sup>1)</sup> 佟娟娟<sup>2)</sup> 王延辉<sup>2)</sup> 王 鹏<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)†</sup>  
李德华<sup>1)</sup> 沈乃 1) 聂玉昕<sup>1)</sup> 董太乾<sup>2)</sup>

1) 中国科学院物理研究所计量测试高技术联合实验室, 北京 100080)

2) 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

(2006 年 2 月 15 日收到, 2006 年 5 月 9 日收到修改稿)

为了实现对锁模飞秒钛宝石激光器的相位控制, 采用改进的相移测量装置, 使载波包络频移信号的信噪比提高到了 40 dB 以上. 在此优化测量结果的基础上, 利用电子锁相环技术, 通过 PZT 改变激光器腔内端镜的倾斜将飞秒激光脉冲的载波包络相位锁定到了微波参考源 TV-Rb 钟 10 MHz 标准信号上, 同时激光脉冲重复频率也采用另一个 PZT 控制激光腔长锁定到了同一个 TV-Rb 钟 10 MHz 信号上. 锁定后的结果显示重复频率的锁定达到了 TV-Rb 钟本身的稳定度, 而载波包络相位锁定后比锁定前稳定度提高了三个数量级.

关键词: 载波包络相移, 锁相环, 飞秒激光, TV-Rb 钟

PACC: 4280W, 4255R, 4260, 4260H

## 1. 引 言

近年来随着啁啾镜技术及色散补偿技术的不断改进, 克尔透镜锁模激光器输出的飞秒脉冲最短脉宽纪录已经接近一个光振荡周期(对于 800 nm, 光振荡周期是  $2.5 \text{ fs}$ )<sup>[1-3]</sup>. 相对于长脉宽的激光脉冲 ( $> 30 \text{ fs}$ ), 对于如此短的周期量级的激光脉冲除了考虑光强、峰值功率、能量、偏振等基本光学参数外, 还必须考虑一个重要的参数, 即载波包络相位. 因为在很多应用中, 比如强场物理、非线性光学, 阿秒脉冲产生和高次谐波产生等等<sup>[4-6]</sup>, 现象的产生与效率不仅与飞秒激光脉冲的强度、脉宽有关, 而且与飞秒脉冲电场载波包络之间的相位有直接关系, 甚至取决于相位值. 所以飞秒激光脉冲载波包络相位的测量与控制目前已成为国际上超快激光技术领域的一个研究热点. 稳定了载波包络相位的飞秒激光脉冲的另一个重要应用是在计量领域. 早在 1978 年 Hansch 等人就提出了利用锁定相位的飞秒激光器

作为光频梳去测量其他激光频率的思想<sup>[7]</sup>, 这种方法不仅摆脱了过去光学测频时所用的复杂相干频率链设备, 直接实现了射频与光频的连接, 而且使基本物理单位的确定, 如时间、长度等标准的精度也大大提高. 1999 年 Hansch 的课题组利用这个办法测出了频差达 20 THz 的光频率<sup>[8]</sup>.

本文搭建了一台钛宝石飞秒激光器, 结构与文献 [9] 报道的类似. 在文献 [9] 测量飞秒脉冲载波包络频移的基础上, 采用不同的测量装置优化了测量到的拍频信号信噪比, 接着采用倾斜腔内端镜的方法, 通过外加电子锁相环将这个漂移的频率锁定到了外部的 TV-Rb 钟输出的稳定的 10 MHz 参考信号上, 同时将重复频率也锁定到了这台 TV-Rb 钟上, 重复频率锁定后的稳定度达到了 TV-Rb 钟本身的稳定度. 这种锁定了重复频率和载波包络相移的飞秒激光器既可以作为光学频率梳, 为直接测量绝对光频提供工具, 而且可以作为稳定的种子源经过放大后去驱动惰性气体产生高次谐波和阿秒脉冲.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60225005, 10227401, 60490280)和中国科学院知识创新工程资助的课题.

† 通信作者, E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

## 2. 飞秒激光脉冲载波包络相移测量装置与结果

由于腔内群速和相速色散的原因,克尔透镜锁模激光器输出的飞秒激光脉冲序列之间会产生载波包络相移,最简单的测量这个相移的方法是频率域

内的自参考测量技术<sup>[10-12]</sup>利用光子晶体光纤产生的大于一个光倍频程的超连续谱中的两个光谱成分,将低频光谱成分倍频后与另一个相近的高频成分进行相干外差拍频,即可得到载波包络相移在频率域上的频移量.测量原理与文献[9]的报道相同,但是为了提高拍频信号的信噪比,我们采用了另一种新的测量光路,实验装置如图1所示.

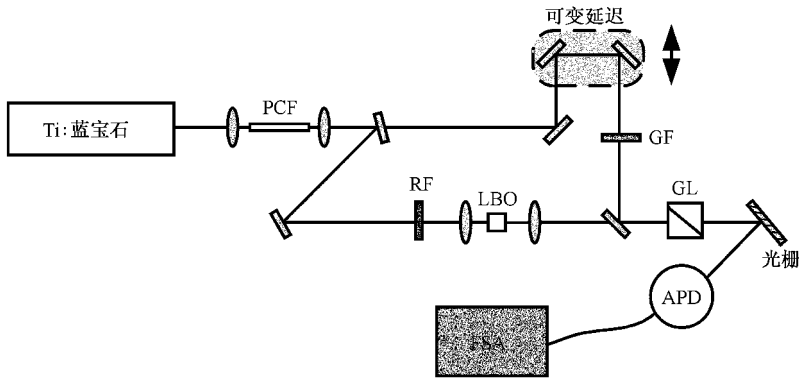


图1 拍频测量实验装置图.PCF为光子晶体光纤;LBO为倍频晶体;APD为雪崩光电二极管(Hamamatsu c5658);GF为绿光滤光片;RF为红滤光片;GL为格兰棱镜;Grating为光栅;FSA为射频频谱仪(Agilent ESA4402B)

装置中钛宝石激光器输出的飞秒脉冲平均功率为350 mW,脉宽为18 fs,中心波长是800 nm.为了测量飞秒脉冲载波包络相移,首先将此飞秒脉冲经40倍的显微物镜聚焦后耦合到一段长5—20 cm的光子晶体光纤中,光子晶体光纤的纤芯是1.8  $\mu\text{m}$ ,零色散波长在710 nm.精确调节焦距及位置使飞秒脉冲在光子晶体光纤中产生大于一个光倍频程的超连续谱,然后用相同倍率的显微物镜对输出的超连续光进行准直.接着用一个双色镜(1064 nm全反,532 nm全透)将超连续谱中的1064 nm和532 nm光脉冲分成两路,在其中532 nm的光路中使用一对直角镜调节两路光的光程相等,另一路1064 nm光路中放4 mm厚LBO倍频晶体得到532 nm的倍频光,再将这两路光通过一个双色镜合成一路,此时超连续谱中的532 nm光脉冲与倍频的532 nm光脉冲相干叠加将产生拍频信号.为了接收此拍频信号需将叠加光再入射到一块光栅(1200/mm)上,经光栅衍射的波长为532 nm的光最后被聚焦到雪崩二极管(hamamatsu c5658)的接收面上,所产生的电信号由射频频谱分析仪(Agilent ESA-E4402B)来记录.精密调节光程延迟使两路光脉冲在时间和空间上精确重合,即可在频谱仪上观察到清晰的拍频信号,此拍频信号中包含了飞秒脉冲载波包络频移量.图2所示为示波器和频谱仪同时记录到的拍频信号.可以看

出,示波器中记录的波形是被拍频调制的锁模飞秒脉冲序列,而对应的频谱仪记录到的则是此时锁模飞秒脉冲序列的重复频率及载波包络频移值.由于锁模飞秒激光器输出的时间间隔相同的相邻飞秒脉冲序列之间的载波包络相移相同,根据这个相移在

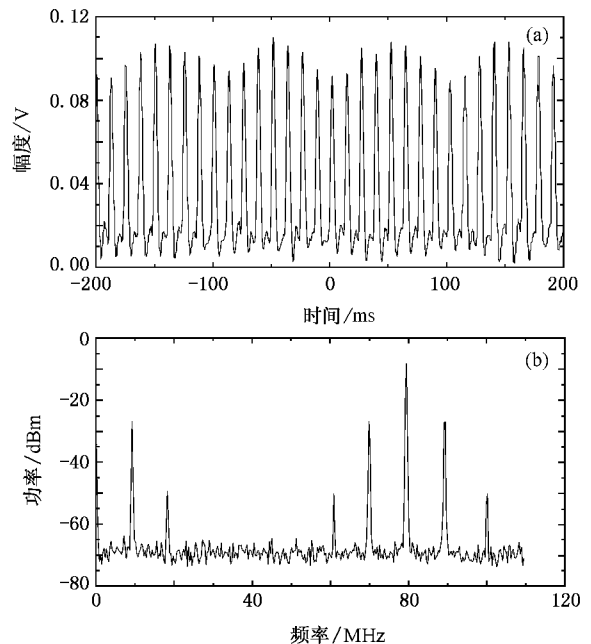


图2 拍频测量图 (a)示波器显示的被拍频调制的飞秒脉冲序列 (b)频谱仪显示的重复频率及拍频

频率域上引入的频梳的频移量与重复频率之间的变换关系  $\delta = \Delta\phi f_{\text{rep}}/2\pi$  可以看出,当相移  $\Delta\phi = \pi/4$  时,  $\delta = f_{\text{rep}}/8$ ,即每隔 8 个脉冲,飞秒脉冲的载波包络相位会重复一次.同理,如果  $f_{\text{rep}}/\delta = 8$ ,也证明  $\Delta\phi = \pi/4$ .图 2 中示波器显示了  $\delta = f_{\text{rep}}/8$  的飞秒脉冲序列变化情况,此时被拍频调制的包络中包含 8 个飞秒脉冲,即每隔 8 个脉冲,飞秒脉冲的载波包络相位重复一次,而频谱仪记录的是此时的重复频率和拍频信号.重复频率两边的是重复频率与拍频的和频和差频信号.由图可以看出拍频信号信噪比超过了 40 dB,而电路要求实现锁定的最低信噪比是 30 dB,这说明优化后的拍频信号为电路锁定奠定了基础.

### 3. 锁相环控制飞秒激光载波包络相移实验装置与结果

对于克尔透镜锁模激光器输出的飞秒脉冲序列中载波包络相位的控制,目前国际上普遍采用两种方法,一是加入 AOM 或 EOM 控制抽运光强<sup>[13-15]</sup>,二是在腔内靠近棱镜端的高反镜上装 PZT 控制其倾斜<sup>[15-18]</sup>,这两种方法的原理都是通过调节腔内群速和相速的色散达到改变载波包络相移的目的,具体的实施技术都是通过电子锁相环技术将这个频率锁定到外部标准原子钟参考源上.根据飞秒激光器频率域中绝对频梳的表达式  $f_n = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ ,重复频率  $f_{\text{rep}}$  和载波包络频移  $f_{\text{ceo}}$  是可以被控制的两个自由

度.如果它们都被直接锁定到微波频标,相当于频梳中的每个纵模都具有绝对稳定的光频.这种锁相稳频飞秒激光器输出的稳定而均匀的频梳可以视为一把非常理想的尺子,用它可以度量在其覆盖频段内的任何被测光频.

本实验采用的是第二种控制方法,压电陶瓷控制腔镜倾斜法,实验装置如图 3 所示.虚线框内的是自主搭建的要被锁定的飞秒钛宝石激光振荡器.抽运源为二极管激光抽运的全固化倍频 Nd:YVO<sub>4</sub>532 nm 激光器(Coherent Verdi5).钛宝石激光振荡器腔型采用了典型的 X 结构,在腔内使用了一对棱镜来补偿色散以压窄脉宽,同时腔内用到了 5 片镀宽带膜的高反平面镜,其中无棱镜一臂的折叠镜上装了一个压电陶瓷(PZT),用来控制腔长,达到稳定重复频率的目的;有棱镜对的一臂中,靠近棱镜的端镜上装了两个 PZT,可以倾斜端镜控制腔内脉冲的群速与相速色散,从而达到控制载波包络相位的目的.

图中虚线代表的是锁定电路.为了锁定飞秒激光振荡器的重复频率和载波包络相位这两个参数,实验中使用了两套电子锁相环来分别控制它们.重复频率信号的接收使用的是一个快速光电二极管.从谐振腔棱镜边漏射出来的飞秒脉冲入射到这个光电二极管上首先转化为重复频率电信号,将此重复频率电信号经电路放大、分频后送入锁相环与 TV-Rb 钟输出的 10 MHz 标准信号鉴频鉴相就可得到一个误差信号,直接用这个误差信号去控制 PZT1,PZT 的伸缩可以改变谐振腔长从而改变重复频率,用这

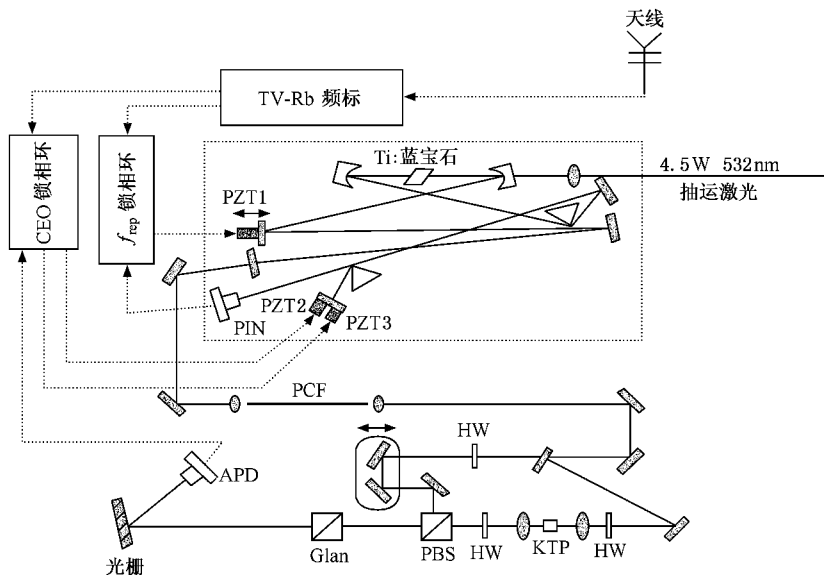


图 3 钛宝石锁模飞秒激光器相位锁定实验装置图(PZT 为压电陶瓷,PIN 为光电二极管,APD 为雪崩二极管,KTP 为倍频晶体,PBS 为偏振分光棱镜,Glan 为格兰棱镜, $\lambda/2$  为半波片)

个方法可以将重复频率稳定到一个固定值. 同样对于载波包络相移的控制也是将 APD 接收到的载波包络频移电信号经滤波放大后再与 TV-Rb 钟输出的 10 MHz 标准信号鉴频鉴相得到一个误差信号, 用此误差信号去控制 PZT2 和 PZT3 的伸缩就会使镜子有一个轻微的倾斜, 从而改变飞秒脉冲的载波包络相移并将其控制在一个固定值.

频谱仪上记录到的是瞬时的载波包络频移值, 实际中这个频移并不是固定不变的, 受振荡器本身及外界环境的影响, 载波包络频移随时间有很大的漂移, 如果没有很好地屏蔽及防风隔音措施, 漂移量最大在 MHz 的范围, 这对阿秒的产生以及频标的建立都极其不利. 实验中我们利用一个电子伺服锁相环, 将此参量锁定到了 TV-Rb 频标的 10 MHz 标准输出上, 稳定后的载波包络频移值固定在 10 MHz, 波动在 kHz 范围. 图 4 所示为实验测定的用于锁定的 PZT 外加电压与飞秒激光频移值的变化曲线图, 曲线斜率代表压控灵敏度, 锁相环滤波参数的设计主要依赖于这一指标. 图 4(a) 是控制重复频率的 PZT 特性曲线图, 可以算出其压控灵敏度为 10.4 Hz/V, 也就是说在 PZT 上加 1V 的电压会使重复频率改变 10.4 Hz. (b) 是控制载波包络频移的 PZT 的

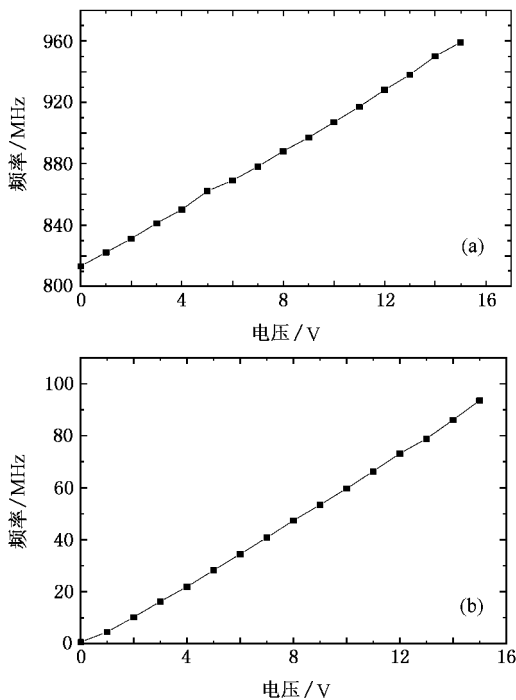


图 4 PZT 电压/频率特性变化曲线图 (a) 控制重复频率的 PZT (b) 控制载波包络相位的 PZT

特性曲线图, 它的压控灵敏度经计算为 7.1 MHz/V. 这两个值都只是设计环路滤波器时选取参数的初步依据, 具体参数的确定还应依据实验中激光器的实际情况.

使用频率计数器记录频率在锁定前和锁定后三分之一的抖动情况, 如图 5 所示, 重复频率在锁定前在 Hz 范围内抖动, 锁定后抖动量降到了 mHz 量级, 所以图中看到的重复频率随时间的变化接近一条直线, 而载波包络频移的抖动量在锁定前和锁定后随时间的变化在图中区别比较明显, 锁定前抖动剧烈, 频率有很大起伏, 锁定后基本上是一条直线, 证明锁定后的频率值可以以很小的波动固定在 10 MHz 附近. 如此就可以将每个光脉冲的载波包络相位都稳定在一个固定的数值, 那么飞秒脉冲频率梳中的每个频率成分就都是绝对稳定的频率, 这为光频的直接测量提供了标准的光学尺子.

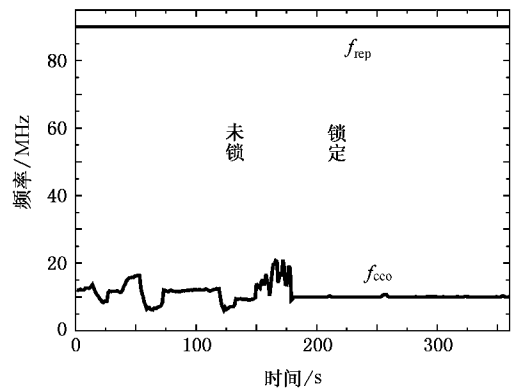


图 5 重复频率及拍频锁定前和锁定后的比较曲线图

## 4. 结 论

首先采用改进的测量装置得到了信噪比大于 40 dB 的飞秒脉冲载波包络频移信号, 在此优化结果的基础上, 利用电子锁相环技术通过 PZT 控制腔内端镜的办法实现了对飞秒钛宝石激光器载波包络相移的锁定与控制. 其中重复频率锁定后的长期稳定度达到了参考源 TV-Rb 钟的稳定度, 载波包络频移锁定后的漂移从未锁前的 MHz 量级降到了 kHz. 进一步优化锁相电路及改进激光器的稳定性可望提高锁定精度和锁定时间, 这种稳频稳相的飞秒激光器可以作为标准的光频梳进行光频测量.

- [ 1 ] Steinmeyer G , Sutter D H , Gallmann L , Matuschek N , Keller U 1999 *Science* **286** 1507
- [ 2 ] Morgner U , Krtner F X , Cho S H *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 411
- [ 3 ] Sutter D H , Steinmeyer G , Gallman L *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 631
- [ 4 ] Reichert J R , Udem H T , Hansch T W 1999 *Opt. Commun.* **172** 59
- [ 5 ] Han H N , Wei Z Y , Cang Y *et al* 2003 *Physics* **132** 762
- [ 6 ] Morgner U , Ell R , Metzler G *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5462
- [ 7 ] Eckstein J N , Ferguson A I , Hansch T W 1978 *Phys. Rev. Lett.* **40** 847
- [ 8 ] Udem Th , Reichert J , Holzwarth R , Hansch T W 1999 *Opt. Lett.* **24** 881
- [ 9 ] Han H N , Zhang J , Wei Z Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 155  
( in Chinese ) 韩海年、张 军、魏志义等 2005 *物理学报* **54** 155 ]
- [ 10 ] Apolonski A , Poppe A , Tempea G *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 740
- [ 11 ] Yohei Kobayashi , Kenji Torizuka 2000 *Opt. Lett.* **25** 856
- [ 12 ] Wei Z Y , Yohei Kobayashi , Kenji Torizuka *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 2121
- [ 13 ] Diddams S A , Jones D J , Ye J *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [ 14 ] Yohei Kobayashi , Zhiyi Wei , Masayuki Kakehata *et al* 2003 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9** 1011
- [ 15 ] Fortier T M , Jones D J , Ye J *et al* 2003 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9** 1002
- [ 16 ] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K , Stentz A , Windeler R S , Hall J L , Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [ 17 ] Steven T , Cundiff , Jun Ye 2001 *Rev. Sci. Ins.* **72** 1
- [ 18 ] Tai Hyun Yoon , Seong Tae Park , Eok Bong Kim *et al* 2003 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9** 1025

## Control of carrier-envelope phase offset in femtosecond laser with PLL and TV-Rb clock<sup>\*</sup>

Han Hai-Nian<sup>1)</sup> Zhang Wei<sup>1)</sup> Tong Juan-Juan<sup>2)</sup> Wang Yan-Hui<sup>2)</sup> Wang Peng<sup>1)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)†</sup>  
Li De-Hua<sup>1)</sup> Shen Nai-Chen<sup>1)</sup> Nie Yu-Xin<sup>1)</sup> Dong Tai-Qian<sup>2)</sup>

1 ) *Joint Laboratory of Advanced Technology in Measurements , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )*

2 ) *School of Electronics Engineering and Computer Science , Peking University , Beijing 100871 , China )*

( Received 15 February 2006 ; revised manuscript received 9 May 2006 )

### Abstract

With the fast development of the cycle-pulse lasers , the control of the carrier-envelope phase offset ( CEO ) frequency has been an important research subject in such fields as femtosecond optical frequency metrology , strong field physics and high harmonic generation. In this paper , a different measurement method for CEO is demonstrated and subsequently a better beat frequency signal with the signal-to-noise ratio greater than 40 dB is obtained. Based on this optimized beat frequency signal , the CEO of the Ti :sapphire laser is stabilized to the standard signal of 10 MHz of the microwave reference source TV-Rb clock by using the electronic phase-locked loop techniques and the piezo-transducers which are mounted on the mirror inside the laser cavity to change the frequency and phase. The repetition rate of the Ti :sapphire laser is locked to the same TV-Rb clock simultaneously. The experimental results showed that the stability of the repetition rate reached the same level as the TV-Rb clock and that of the CEO frequency was increased by three orders.

**Keywords :** carrier-phase phase offset , phase-locked loop , femtosecond laser pulse , TV-Rb clock

**PACC :** 4280W , 4255R , 4260 , 4260H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60225005 , 10227401 , 60490280 ) and the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : wzhy@aphy.iphy.ac.cn