

# 飞秒钛宝石光学频率梳的精密锁定<sup>\*</sup>

韩海年<sup>1,2)</sup> 张 炜<sup>1)</sup> 王 鹏<sup>1)</sup> 李德华<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)†</sup> 沈乃 1) 聂玉昕<sup>1)</sup> 高玉平<sup>3)</sup> 张首刚<sup>3)</sup> 李师群<sup>2)</sup>

1) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 光物理实验室, 北京 100080)

2) 清华大学物理系原子分子与光物理研究所, 北京 100084)

3) 国家授时中心, 临潼 710600)

(2006 年 8 月 17 日收到, 2006 年 9 月 25 日收到修改稿)

经相位锁定后的飞秒钛宝石光学频率梳已经广泛用于绝对光频的测量, 这是光频标领域一个革命性的突破. 在自建的 90 MHz 飞秒钛宝石激光器的基础上首先采用光子晶体光纤将其光谱展宽到一个光倍频程, 接着利用锁相环技术分别将重复频率和载波包络频移同时高精度地锁定到一台稳定性为  $6 \times 10^{-14}$  的 Cs 钟上, 进而得到了稳定度相同的飞秒光学频率梳.

关键词: 飞秒钛宝石振荡器, 光学频率梳, 锁相环

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

## 1. 引 言

1997 年基于激光冷却的原子或离子光频标的出现大大提高了微波频标的精度<sup>[1,2]</sup>, 但光频率不能像微波频率那样由电子计数器直接测量, 传统上测量光频率的方法是经过由各种精密的电子设备和激光器组成的光学频率链后, 再溯源到微波频标对其进行测量和标定<sup>[3,4]</sup>, 这样的相干光学频率链体积庞大, 制作和维护成本高昂, 并且一个频率链只能测量一个光频率, 这大大限制了光频标的发展. 1978 年 Hansch 提出利用飞秒激光器测量光频的思想<sup>[5]</sup>, 直到 1999 年才实现了利用一台飞秒激光器作为中间光学频率链代替传统的相干频率链直接测量频差为 20 THz 的光频率<sup>[6]</sup>, 从此光频标的发展进入了崭新的篇章.

利用飞秒激光器来测量光频率的思想是基于其频域上纵模分布间隔相等的特性, 由于这个特性飞秒激光器也称作飞秒激光频率梳. 根据傅里叶变换, 飞秒激光器输出的飞秒脉冲在频域上的分立频率可以表示为  $f_m = mf_{\text{rep}} + \delta$ ,  $f_{\text{rep}}$  指重复频率, 整数  $m$  可视为频梳谱线的标记, 是个很大的整数,  $\delta$  是由于腔内群速和相速的色散导致的脉冲载波包络相位漂移引起的频移值<sup>[7-9]</sup>, 通常  $\delta$  和  $f_{\text{rep}}$  都在微波频率范

围内, 而  $f_m$  是百 THz 量级的光频率, 只要同时锁定了  $\delta$  和  $f_{\text{rep}}$ ,  $f_m$  就成为一个稳定的光频率, 可直接通过相干外差的方法用于测量其他光频. 实际中对  $f_{\text{rep}}$  的测量很容易, 而对于  $\delta$  的测量则首先需要大于一个光倍频程的光谱范围, 然后再利用其中低频成分的倍频与高频成分的拍频得到  $\delta$  信号  $\mathcal{A}(mf_{\text{rep}} + \delta) - \mathcal{A}(2mf_{\text{rep}} + \delta) = \delta$ . 通常的飞秒振荡器都无法直接输出这么宽的光谱, 一般需要借助腔外光子晶体光纤的展宽. 光子晶体光纤是 Knight 等人制备成功的一种非线性系数很大的特殊光纤<sup>[10]</sup>, 当飞秒光脉冲射入后会发生自相位调制等非线性效应而使光谱展宽, 并且展宽的同时不改变光脉冲的脉宽和等间隔分立频谱等特性. 基于光子晶体光纤以上的优良特性, 飞秒激光器与光子晶体光纤组合起来就可以构成一个光谱范围从可见到红外的宽谱飞秒光学频率梳, 再利用电子锁相环技术将  $f_{\text{rep}}$  和  $\delta$  同时锁定到一个高精度的微波频标上<sup>[11,12]</sup>, 那么飞秒频率梳中每一个分立频率都具有与微波频标相同的精度.

本文建造了一套以 90 MHz 飞秒钛宝石激光器和光子晶体光纤展宽为基础的光学频率梳系统, 利用高精锁相环电路将激光器的重复频率  $f_{\text{rep}}$  和载波包络频移  $\delta$  同时锁定到了外部的 Cs 钟源上, 锁定后的精

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60225005, 60490280)和中国科学院知识创新方向性项目资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: zyw@aphy.iphy.ac.cn

度与 Cs 钟参考源一致.这套系统最近已经被用于测量 532 nm 碘稳 Nd :YAG 连续激光器的绝对频率.

## 2. 稳定的宽谱飞秒光学频率梳系统实验装置

### 2.1. 飞秒激光器与光子晶体光纤

飞秒钛宝石激光器和光子晶体光纤共同组成了宽谱飞秒光学频率梳的核心部分,装置如图 1 所示.

飞秒钛宝石激光器采用 X 型棱镜对折叠腔,输出飞秒脉冲的重复频率是 90 MHz.抽运源采用半导体抽运的 Nd :YVO<sub>4</sub> 倍频 532 nm 固体激光器

(Coherent Verdi5),在 4.5 W 的抽运功率下,飞秒钛宝石激光器输出的飞秒脉冲的平均功率约为 400—500 mW.在抽运光光路中放置一个声光调制器(AOM)用来调节抽运光的强度,进而控制飞秒脉冲载波包络相移.将振荡器的一个小腔镜安装在一块压电陶瓷上,腔镜可随着压电陶瓷的伸缩而改变腔长,进而控制飞秒脉冲重复频率.整个飞秒振荡器固定在一块厚 30 mm 的硬铝板上,用厚 10 mm 的硬铝密封起来以隔绝外界环境尤其是风的影响,板和光学平台之间放了四块隔振橡胶,以防平台及地面振动的影响.为了消除声音对激光器的影响还在硬铝的内侧贴了隔音泡沫.采取这些措施后可以有效降低激光器的噪声,有利于电路的精密锁定.

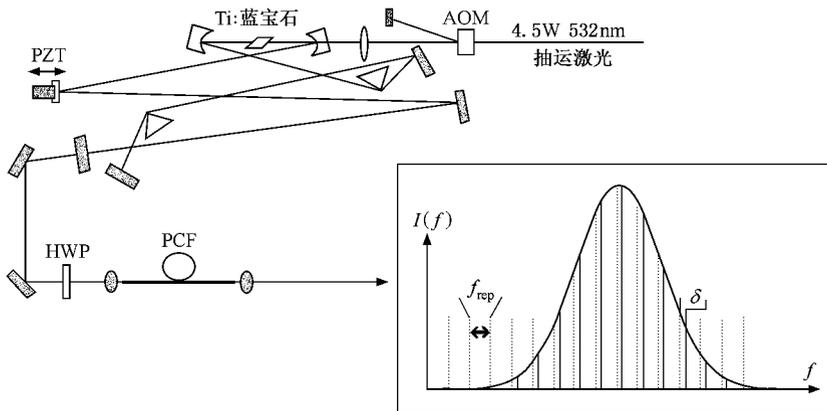


图 1 飞秒钛宝石激光器及用于展宽光谱的光子晶体光纤 AOM 为声光调制器,PZT 为压电陶瓷,HWP 为半波片,PCF 为光子晶体光纤

飞秒钛宝石激光器直接输出的光谱带宽大约是 40 nm,可支持 30 fs 的脉冲宽度,为了将光谱展宽到所需的一个光倍频程,首先将飞秒激光脉冲耦合进一段长 5—20 cm 的光子晶体光纤中,由于光子晶体光纤芯径极细( $\sim 1.8 \mu\text{m}$ ),耦合和准直采用的都是放大倍数为 40 倍的显微物镜.为了保持长期使用,可将光纤放置在一个罩子中,减少光纤头接触灰尘的机会以便延长光纤的使用寿命.飞秒脉冲经过光子晶体光纤后产生的超连续谱强烈依赖于入射光的偏振,因此在光纤前放置一个消色差的半波片能起到选择超连续光谱的作用.方框中是光子晶体光纤输出光谱分布的示意图,其中各个单纵模的功率分布由钛宝石增益曲线决定,中心波长处单纵模功率最高,边缘处单纵模功率逐渐下降.各单纵模间隔为重复频率  $f_{\text{rep}}$ ,由于腔内群速与相速的不同导致整个频梳相对于理想值有一个  $\delta$  的漂移.这两个量如果

同时加以控制就能得到绝对稳定的光频率梳.

### 2.2. 飞秒光学频率梳的相移测量与电子控制装置

对  $\delta$  的测量采用通用的自参考外差相干技术,如图 2 中实线所示,首先用一个双色镜将光子晶体光纤超连续谱中的 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尖劈调节光程差,另一路 1064 nm 光路中放 4 mm 厚 KTP 倍频晶体得到 532 nm 的倍频光,再将这两路光通过一个偏振分光棱镜合成一路,此时超连续谱中的 532 nm 光脉冲与 1064 nm 倍频的 532 nm 光脉冲相干叠加将产生拍频信号.为了有效接收此拍频信号需将叠加光再入射到一块光栅(1200/ mm)上,将光栅衍射的 532 nm 的重叠光最后经小孔光阑限制后聚焦到雪崩光电二极管(hamamatsu c5658)的接收面上,这里所说的 532 nm 实际上只是指中心波长,在拍频的过程

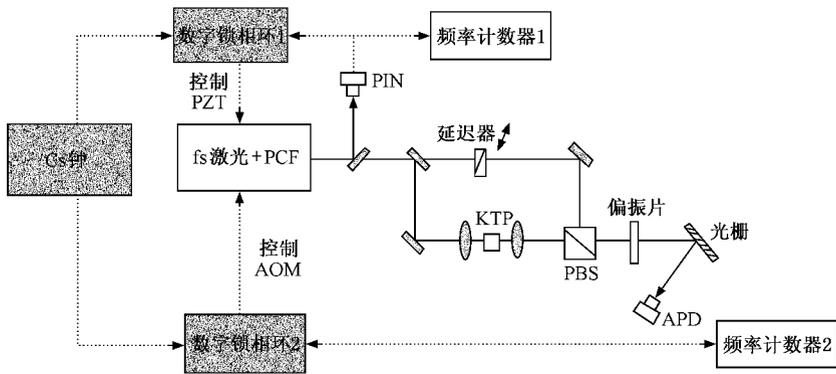


图2 宽谱飞秒频率梳的相位测量光路装置(实线)和锁定电路控制装置(虚线) 数字锁相环1用于控制重复频率,数字锁相环2用于控制载波包络相移;PD为光电二极管;PBS为偏振分光镜;APD为雪崩光电二极管

中 532 nm 附近的很多波长成分都会参与,参与拍频的频谱成分越多,得到拍频信号的信噪比也会越大。雪崩光电二极管前面放置的聚焦镜和光阑也起到滤除杂散光进而提高拍频信噪比的作用。

图2中虚线代表锁定 $f_{\text{rep}}$ 和 $\sigma$ 的电子锁相环控制装置,飞秒频率梳的 $f_{\text{rep}}$ 和 $\delta$ 分别由硅光电二极管(PD)和雪崩光电二极管(APD)接收后,再经过锁相环反馈电路同时锁定到一台稳定度为 $6 \times 10^{-14}$ 的Cs钟上。飞秒频率梳 $f_{\text{rep}}$ 的测量是将光子晶体光纤后的超连续光分出一小部分,经PD接收后再分为两路,一路送入频率计数器监测频率变化情况,另一路送入锁相环路与Cs钟的参考信号比较后得到控制电压再加入到PZT上锁定重复频率。

经APD接收到的拍频信号 $\delta$ 信噪比通常在40—50 dB之间,满足电路锁定最少30 dB的信噪比要求,同样将接收到的 $\delta$ 信号分为两路,一路送入第二个频率计数器中进行监测,另一路送入第二个数字锁相环中与Cs钟的参考信号比较后得到控制电压通过AOM调整抽运光功率来锁定载波包络相移 $\delta$ 。

### 3. 飞秒光学频率梳的精密锁定及结果分析

#### 3.1. 重复频率的精密锁定

为了高精度地锁定飞秒脉冲的重复频率,我们提取重复频率的89次谐波8.01 GHz作为输入信号与参考信号进行比较,参考信号由以Cs钟为基准的频率综合器提供。之所以采用这样的方法是因为根

据飞秒振荡器的噪声分析理论,重复频率的高次谐波携带更多的相位噪声信息,如果直接锁定了高次谐波相当于抑制了更多的激光器噪声,从而间接提高了重复频率的锁定精度。重复频率锁定前计数器显示其抖动量在Hz量级,而锁定后重复频率的抖动如图3所示,平均在 $10 \mu\text{Hz}$ 的范围内抖动(采用尾数监测的方法读取),比未锁前提高了6个数量级。而在我们之前的报道中直接锁定重复频率基频<sup>[13]</sup>,锁定后重复频率在mHz位抖动,很明显这里采用的高次谐波锁定法具有更高的精度。

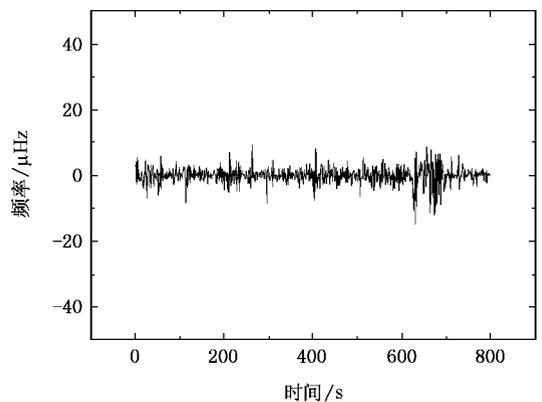


图3 重复频率锁定后的变化曲线图

#### 3.2. 载波包络相移的精密锁定

由于各种抖动机理的影响,飞秒脉冲载波包络相移信号未锁时在几十kHz量级抖动,对于如此快速的抖动需要锁相环路有较高的响应速度,尤其是控制元件的响应速度一定要跟上,在之前的报道中我们采用PZT倾斜腔镜的方法控制 $\delta$ <sup>[13]</sup>,这种方法

的锁定精度受限于 PZT 的响应速度,为了进一步提高锁定精度,我们这里采用 AOM 调整抽运光功率的方法,AOM 是声光转换器件,响应速度可达百 kHz 量级,对于  $\delta$  的快抖完全可以跟踪上.相比倾斜腔镜控制法,AOM 控制法的优点是响应速度快,锁定精度高,但缺点是同步带变窄,同步时间缩短,这可以通过加上慢环控制进行补偿.图 4 是频率计数器

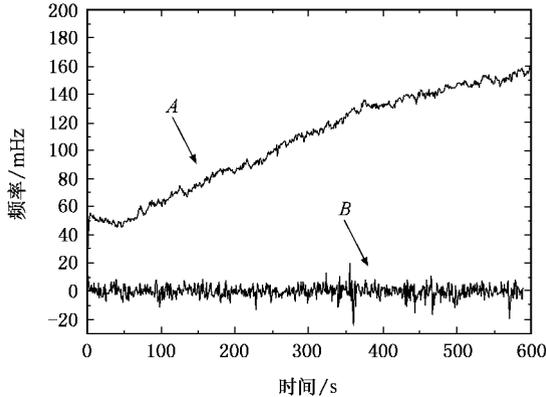


图 4 载波包络频移锁定后的变化曲线图 曲线 A 为重复频率未锁,曲线 B 为重复频率同时锁定

记录到的载波包络频移  $\delta$  在重复频率未锁和重复频率锁定两种情况下的变化曲线,可以看出,锁定后  $\delta$  稳定到了 mHz 位,而当重复频率未锁时  $\delta$  随时间慢慢地向高频方向漂移,当重复频率同时锁定时  $\delta$  基本没有漂移,说明  $\delta$  对重复频率很敏感.

## 4. 结 论

在自建的重复频率为 90 MHz 的飞秒钛宝石振荡器的基础上,首先采用光子晶体光纤将钛宝石振荡器直接输出的飞秒脉冲的光谱展宽到一个光倍频程,接着利用锁相环技术,分别将飞秒激光脉冲的重复频率和载波包络频移  $\delta$  锁定到稳定度为  $6 \times 10^{-14}$  的 Cs 钟上.为了提高锁定精度,对重复频率的锁定采用了提取其 89 次谐波的锁定方法,锁定后重复频率的漂移变化在  $\mu\text{Hz}$  量级,比未锁前提高了 6 个数量级,而对于  $\delta$  的锁定则利用了声光调制器(AOM)快速调制抽运光功率的方法,使锁定前抖动量在几十 kHz 量级的  $\delta$  信号稳定到了 mHz 量级,从而初步实现了频率稳定性在  $10^{-14}$  量级的飞秒光学频率梳.

[ 1 ] Oates C W , Bondu F , Fox R W , Hollberg L 1999 *Eur. Phys. J. D* **7** 449  
 [ 2 ] Fisk P T H 1997 *Rep. Prog. Phys.* **60** 761  
 [ 3 ] Jennings D A , Pollock C R , Peterson K R *et al* 1984 *Opt. Lett.* **8** 136  
 [ 4 ] Schnatz H B , Lipphardt J , Helmcke F R , Zinner G 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 18  
 [ 5 ] Eckstein J N , Ferguson A I , Hansch T W 1978 *Phys. Rev. Lett.* **13** 847  
 [ 6 ] Udem Th , Reichert J , Holzwarth R , Hansch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568  
 [ 7 ] Xu L , Spielmann C , Poppe A , Brabec T , Krausz F , Hansch T W 1996 *Opt. Lett.* **21** 2008  
 [ 8 ] Telle H R , Steinmeyer G , Dunlop A E , Stenger J , Sutter D H ,

Keller U 1999 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **69** 327  
 [ 9 ] Han H N , Wei Z Y , Zhang J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 155 (in Chinese) 韩海年、魏志义、张 军等 2005 物理学报 **54** 155 ]  
 [ 10 ] Knight J C , Birks T A , Russell P St J , Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **19** 1547  
 [ 11 ] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K , Stentz A , Windeler R S , Hall J L , Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635  
 [ 12 ] Apolonski A , Poppe A , Tempea G , Spielmann C , Udem T , Holzwarth R , Hansch T W , Krausz F 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 740  
 [ 13 ] Han H N , Zhang W , Tong J J *et al* 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 291 (in Chinese) 韩海年、张 炜、佟娟娟等 2007 物理学报 **56** 291 ]

# Precise control of femtosecond Ti :sapphire laser frequency comb<sup>\*</sup>

Han Hai-Nian<sup>1,2)</sup> Zhang Wei<sup>1)</sup> Wang Peng<sup>1)</sup> Li De-Hua<sup>1)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)†</sup> Shen Nai-Chen<sup>1)</sup>  
Nie Yu-Xin<sup>1)</sup> Gao Yu-Ping<sup>3)</sup> Zhang Shou-Gang<sup>3)</sup> Li Shi-Qun<sup>2)</sup>

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

2 *Atomic Molecule and Optical Physics Laboratory, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

3 *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600, China*

( Received 17 August 2006 ; revised manuscript received 25 September 2006 )

## Abstract

Phase controlled Femtosecond Ti :sapphire laser frequency comb have been widely used in measurement of absolute optical frequency, which is the revolutionary progress in the optical metrology. In this paper, based on the home-made 90 MHz femtosecond Ti :sapphire laser, we firstly broadened the spectrum output directly from the laser to more than one octave with a piece of photonic crystal fiber, then locked precisely both the repetition rate and the carrier-envelope phase offset frequency to the same Cs clock with the stability of  $6 \times 10^{-14}$  by use of two sets of different phase-locked loops. As a result, we obtained the phase controlled Femtosecond laser frequency comb with the stability of the Cs clock.

**Keywords** : femtosecond Ti :sapphire laser, frequency comb, phase-locked loops

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

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60225005 and 60490280 ).

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