

PPLN 晶体差频测量飞秒激光脉冲的载波包络相移^{*}

韩海年¹⁾²⁾ 赵研英¹⁾ 张 炜¹⁾ 朱江峰¹⁾ 王 鹏¹⁾ 魏志义^{1)†} 李师群²⁾

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)

(2006 年 7 月 8 日收到, 2006 年 8 月 31 日收到修改稿)

在飞秒激光频率梳系统中, 通常采用自参考技术测量飞秒激光脉冲的载波包络相移, 但该技术需要采用光子晶体光纤进行光谱扩展从而增加了系统的不稳定性. 这种技术已经制约了高稳定度的飞秒激光频率梳的发展. 采用 PPLN 晶体差频法测量了宽谱钛宝石振荡器输出的 7 fs 激光脉冲的载波包络频移, 得到了大于 30 dB 的拍频信号, 为研制无光纤的新一代高稳定度光学频率梳奠定了基础.

关键词: 飞秒光学频率梳, 自参考技术, 差频技术, 载波包络相移

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

1. 引 言

飞秒激光脉冲载波包络相移(CEO)控制在强场物理, 非线性光学及频标领域有非常重要的应用^[1-5], 如高次谐波的产生, 阿秒 X 射线的产生以及多波长傅里叶合成产生亚飞秒的可见光, 飞秒频梳测频, 光钟等都需要载波包络相移稳定的飞秒激光脉冲. 近年来, 利用锁相环反馈电路作用到激光腔中已经实现了飞秒激光脉冲载波包络相移的高精度控制^[6,7], 通用的测量载波包络相移的方法是频域中的自参考测量技术^[8,9], 又称 $f-2f$ 技术, 该技术首先借助光子晶体光纤腔外展宽飞秒脉冲的光谱范围, 进而利用展宽的超连续谱中的高频成分与低频成分的倍频所产生的拍频信号得到载波包络频移量, 根据公式 $f_{\text{ceo}} = \Delta\phi_{\text{rep}}/2\pi$, 只要同时控制了飞秒激光脉冲的重复频率 f_{rep} 和载波包络频移 f_{ceo} , 载波包络相移 $\Delta\phi$ 就是绝对稳定的. 这种测量和控制载波包络相移的方法虽然原理简单, 但是在系统中引入的光子晶体光纤一般芯径只有 1—2 μm , 要想将光耦合到这么细的光纤中并且保持长时间的稳定非常困难, 加之光纤头易受灰尘污染, 必须定期切割光纤, 所以光纤的使用不利于飞秒激光频率梳系统长期、稳定、可靠地运行.

2004 年接连报道了利用差频产生载波包络相移自稳定的飞秒激光脉冲及飞秒频率梳^[10-13], Fuji 等人最近利用薄片 PPLN 晶体差频法实现了无光子晶体光纤的宽谱飞秒钛宝石激光器直接输出相移自稳定的飞秒激光脉冲^[10], 并且得到了载波包络相移的拍频信号, 这是目前最简单的测量载波包络频移信号的方法. 本文利用此方法实现了对自建的重叠频率为 160 MHz 的宽谱飞秒钛宝石激光振荡器的载波包络频移信号的测量, 并得到了以 1600 nm 为中心波长的载波包络相移自稳定的差频梳, 频谱仪记录到的拍频结果显示, 载波包络频移信号的信噪比可达 34 dB, 完全可以达到锁相环直接控制的要求.

2. 差频测量载波包络频移的物理机理

与 $f-2f$ 测量技术类似, 差频法也是利用两个波长接近的光谱成分拍频得到载波包络频移信号的, 只是这里参与拍频的光谱成分一个来自基频光, 另一个来自差频光, 所以又称这种方法为 $0-f$ 测量技术, 下面详细介绍此方法的物理机理及其优点.

通常飞秒激光振荡器输出的飞秒脉冲串在频域上是一系列间隔相等幅度不等的分立频谱成分, 又称为飞秒频率梳, 其中每个光谱成分的频率表达式可以写为

^{*} 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.

[†] 通讯作者: zyw@aphy.iphy.ac.cn

$$f_n = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}, \quad (1)$$

这里 n 是一个数值很大的整数, 代表频率梳谱线的标记. 假设其中的某些低频成分与高频成分在非线性晶体中产生差频效应. 差频光谱的表达式为

$$\begin{aligned} f_d &= (n_1 f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}) - (n_2 f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}) \\ &= (n_1 - n_2) f_{\text{rep}}. \end{aligned} \quad (2)$$

可以看出, 差频光中 f_{ceo} 为 0, 也就是说, 差频光梳是相位自稳定的. 这样的光可作为种子光进一步放大从而得到相位为 0 的自稳定的强飞秒激光脉冲, 这在强场物理的高次谐波产生研究中具有重要应用.

在 (1) 和 (2) 式中假设 n 与 $n_1 - n_2$ 相同, 然后将 (1) 与 (2) 式相减, 就可得到 f_{ceo} 拍频信号, 即

$$f_n - f_d = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} - (n_1 - n_2) f_{\text{rep}} = f_{\text{ceo}}. \quad (3)$$

实验上的测量原理如图 1 所示. 图中基频梳曲线代表振荡器直接输出的光谱经自相位调制效应后得到的展宽光谱, 由于自相位调制效应只是将光谱展宽, 并没有改变光谱的特性, 所以这里仍然叫做基频梳. 曲线包络内的虚竖线代表实际的频率梳的位置, 也就是 f_{ceo} 不为 0 的频梳谱线. 差频梳曲线代表基频梳中某些低频和高频光谱(如箭头所示)经差频效应后产生的光脉冲的光谱曲线, 可以看出这个差频梳曲线位于红外区, 曲线包络内的实竖线代表载波包络相移为 0 的频梳谱线, 在基频梳和差频梳的重合区会发生 (3) 式所指的拍频现象, 于是探测这部分的光信号就会得到载波包络频移的拍频信号.

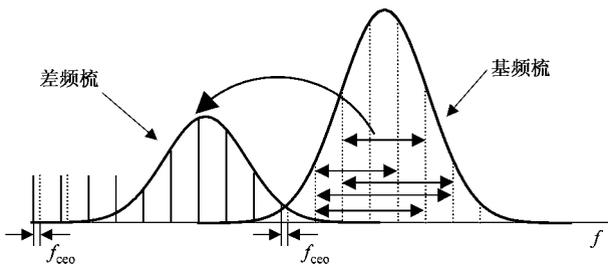


图 1 差频法测量飞秒激光脉冲载波包络频移的原理图

晶体差频法测量飞秒激光脉冲载波包络频移的最大优点在于取代了系统中的光子晶体光纤, 这一方面使频率梳系统更加稳定, 另一方面由于经过差频晶体后的基频光功率损耗很小, 基频光分离出来可以继续用作放大的种子光, 而光子晶体光纤的耦合效率通常只有 20%—30%, 飞秒脉冲经过光子晶体光纤后功率损失较大, 这不利于放大和测频的应用. 但相比自参考测量法, 差频测量对飞秒振荡器的

要求较高, 为了保证差频及自相位调制效应同时产生, 要求飞秒振荡器输出的飞秒脉冲谱宽足够宽 (600—1000 nm), 脉宽足够窄 (< 10 fs). 我们实验室使用商用宽带啁啾镜建成了宽谱 7 fs 钛宝石振荡器, 在此基础上, 利用差频技术对这台振荡器输出的飞秒激光脉冲的载波包络相移进行了测量.

3. 实验装置

差频测量飞秒激光脉冲的实验装置如图 2 所示. 方框中的钛宝石振荡器与文献 [14] 中的啁啾镜补偿色散的宽谱振荡器类似, 只是为了更好地补偿腔内的高阶色散, 我们在腔内加入了一对尖劈, 如图 3 所示. 同时腔内尖劈的作用还在于通过调节插入

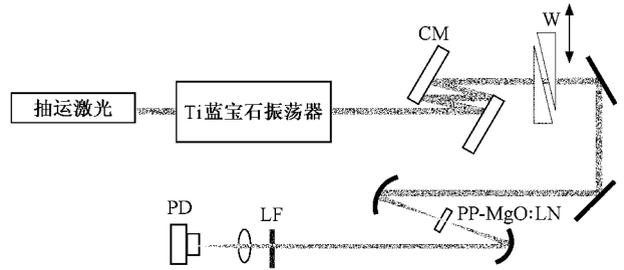


图 2 差频实验装置图. CM 为啁啾镜, W 为尖劈, PP-MgO:LN 为差频晶体, LF 为长通滤光片, PD 为红外光电二极管

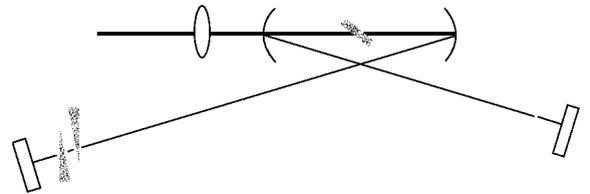


图 3 宽谱钛宝石振荡器结构示意图

量改变飞秒脉冲的载波包络相移. 经过改造后的振荡器输出飞秒脉冲重复频率为 160 MHz, 在 4 W 的抽运光功率下输出的飞秒激光脉冲平均功率在 400 mW 左右, 输出谱宽范围为 600—1000 nm. 根据理论计算, 具有如此宽谱的飞秒脉冲其持续时间在 10 fs 以下, 此时就必须考虑在腔外进行色散补偿才能保证得到傅里叶变换极限的脉冲宽度. 图 2 中放在腔外的一对啁啾镜和一对尖劈用以提供合适的正负色散, 从而保证得到的飞秒脉冲是无啁啾的. 将这样的飞秒脉冲再通过一个焦距为 25 mm 的凹面镜聚焦到一块厚度为 2 mm 的 PP-MgO:LN 晶体 (HC

Photonics)上, PP-MgO:LN 晶体是电极化准相位匹配晶体,其电极化周期为 $11.21 \mu\text{m}$,适合常温下 $620 \text{ nm} \sim 1000 \text{ nm}$ 宽谱范围内 0 型 ($e + e \rightarrow e$) 匹配的差频光产生.接着用一个同样焦距的凹面银镜对出射光进行准直,最后可以用合适的全反镜将准直后的基频光导出来留做种子光,只让产生的红外光经过一个长通滤光片(1400 nm 截止滤光片)后射入红外 InGaAs 光电二极管进行接收,这里因为我们暂时没有用到基频光所以没有将其导出来,而是将全部的光都经过滤光片后再接收.

4. 实验结果

用 PPLN 晶体差频法取代光子晶体光纤来测量飞秒脉冲的载波包络相移关键在于振荡器的光谱和脉宽特性,首先振荡器输出的飞秒脉冲的光谱宽度要满足差频产生的要求.图 4 是宽谱钛宝石振荡器输出的飞秒脉冲的光谱曲线图,可以看出光谱覆盖了从 600 nm 到 1000 nm 的范围,满足差频晶体 $620 \sim 1000 \text{ nm}$ 的谱宽要求,而且这样的谱宽可以支持大约 7 fs 的超短光脉冲,通过仔细调节腔外的啁啾镜和尖劈插入可以获得无啁啾的最短飞秒脉冲输出,从而保证聚焦到 PPLN 晶体中时可以同时产生较强的自相位调制效应和差频效应,这两种效应都会将基频光扩展到红外区,图 5 是我们用光谱仪(Ando, AQ6315A)测量到的 PPLN 晶体后产生的红外光,由于产生的红外光很弱,而透过的 800 nm 的基频光仍然很强,所以在测量时需要用合适的滤光片将基频光及产生的 400 nm 倍频光都滤掉,然后用透镜聚焦后才能测到对比度较高的红外光谱.可以看出,红外光谱范围是从 1100 nm 到 1700 nm ,这是差频和自

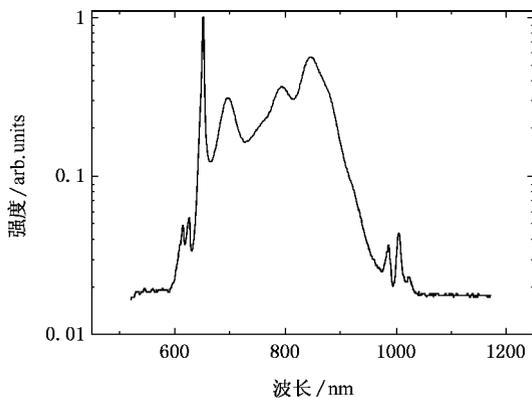


图 4 宽谱飞秒振荡器输出的飞秒脉冲的光谱曲线图

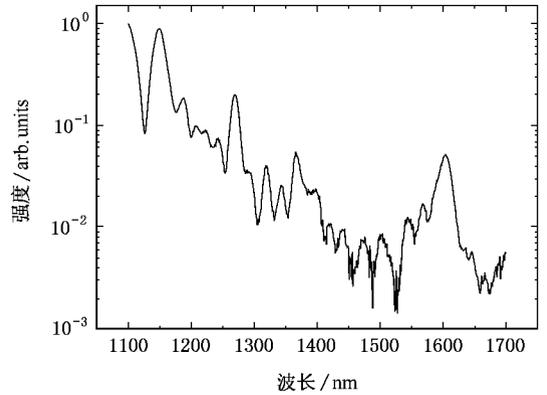


图 5 PPLN 晶体后测到的红外光谱曲线(Ando, AQ6315A)

相位调制共同作用产生的,而 1600 nm 处的波峰代表此处的差频效应较强.实验中我们发现光谱强度对汇聚到 PPLN 晶体上的飞秒激光的焦点比较敏感,稍稍移动焦点的位置红外光谱就有可能消失或变弱,证明晶体中非线性效应的产生与焦点位置有很大关系.为了探测在红外区发生的拍频效应,我们用长通滤光片和红外 APD 接收大于 1400 nm 的光谱,同时用频谱仪记录拍频信号,如图 6 所示,图中最高峰代表重复频率 160 MHz ,最左边的谱线代表载波包络频移的拍频信号,中间的是重复频率与拍频的差频,频谱仪的分辨率设为 100 kHz ,调节腔内尖劈的插入可以看到频谱仪上拍频信号在移动,证明这确实是载波包络频移信号,而且信噪比达到了 34 dB ,为下一步的电路锁定提供了前提条件.

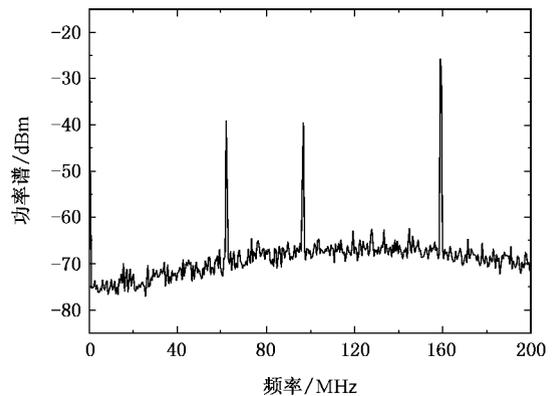


图 6 在红外区测到的载波包络频移的拍频信号及重复频率信号

5. 结 论

PPLN 晶体差频法测量飞秒激光脉冲的载波包

络频移具有结构简单,容易调节等优点,而且利用它取代借助光子晶体光纤测量频移的自参考测量法可以极大地提高系统的稳定性,延长系统运行时间.我们在自建的宽谱振荡器的基础上,利用差频法测量了该振荡器输出的 7 fs 宽谱脉冲的载波包络频移,

在差频和自相位调制效应的共同作用下,飞秒脉冲的光谱扩展到了 1100—1700 nm 的红外区,并且通过接收大于 1400 nm 的红外光观察到了拍频信号,其信噪比大于 30 dB,这为下一步研制无光纤的稳定飞秒激光频率梳系统奠定了良好的基础.

- [1] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
- [2] Durfee C G, Rundquist A R, Backus S, Heme C, Murnane M M, Kapteyn H C 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2187
- [3] Christov I P, Murnane M M, Kapteyn H C 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1251
- [4] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann Ch, Reider G A, Milosevic N, Brabec T, Corkum P, Heinzmann U, Drescher M, Krausz F 2001 *Nature* **414** 509
- [5] Diddams S A, Hollberg L, Ma L S, Robertsson L 2002 *Opt. Lett.* **27** 58
- [6] Apolonski A, Poppe A, Tempea G, Spielmann C, Udem T, Holzwarth R, Hansch T W, Krausz F 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 740
- [7] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [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.* (in Chinese) **54** 149 (in Chinese) 韩海年、魏志义、张 军等 2005 物理学报 **54** 149]
- [10] Fuji T, Apolonski A, Krausz F 2004 *Opt. Lett.* **29** 632
- [11] Takao Fuji, Jens Rauschenberger *et al* 2005 *Opt. Lett.* **30** 332
- [12] Zimmermann M, Gohle Ch, Holzwarth R, Udem Th, Haensch T 2004 *Opt. Lett.* **29** 310
- [13] Mücke O D, Kuzucu O, Wong F N C, Ippen E P, Kaertner F X, Foreman S M, Jones D J, Ma L S, Hall J L, Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 2806
- [14] Tian J R, Han H N, Zhao Y Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4728 (in Chinese) 田金荣、韩海年、赵研英等 2006 物理学报 **55** 4728]

Measurement of carrier-envelope phase of few cycles Ti :sapphire laser by difference frequency technique

Han Hai-Nian¹⁾²⁾ Zhao Yan-Ying¹⁾ Zhang Wei¹⁾ Zhu Jiang-Feng¹⁾ Wang Peng¹⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾ Li Shi-Qun²⁾

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*

(Received 8 July 2006 ; revised manuscript received 31 August 2006)

Abstract

The self-reference technique is widely used to measure the carrier-envelope phase offset (CEO) of femtosecond laser pulses in the normal femtosecond laser frequency comb system. However, the instability of the frequency comb system is increased because the photonic crystal fiber is introduced into the system to broaden the spectrum of femtosecond laser pulses outside the cavity. In this paper, we presented another method to measure specifically the CEO for the broad spectrum Ti :sapphire oscillator with the pulse duration of 7 fs, namely the difference frequency technique, with which we have obtained the beat frequency signal with a S/N ratio greater than 30 dB. This provided a good precondition for the next generation of the femtosecond laser frequency comb system without the photonic crystal fiber.

Keywords : femtosecond laser frequency comb, self-reference technique, difference frequency technique, carrier-envelope phase offset

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

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60225005 and 60490280).

† Corresponding author, zyw@aphy. iphy. ac. cn