

飞秒钛宝石激光脉冲的载波包络相移测量研究^{*}

韩海年^{1,2)} 魏志义^{1,2)†} 张 军¹⁾ 聂玉昕^{1,2)}

¹⁾ 中国科学院计量测试高技术联合实验室, 北京 100080

²⁾ 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080

(2004 年 1 月 7 日收到, 2004 年 6 月 3 日收到修改稿)

飞秒激光脉冲的载波包络相移测量与控制是实现阿秒脉冲与光学原子钟的重要内容, 在利用光子晶体光纤扩展飞秒钛宝石激光振荡器光谱的研究基础上, 通过自参考技术测量并优化了该激光输出脉冲的载波包络相移所引起的拍频信号. 实验上采用半导体抽运的倍频 Nd:YVO₄ 532nm 激光器作为抽运源, 对钛宝石激光器所产生的平均功率 500mW、脉宽 18fs 的光脉冲进行拍频测量后观察到约 23MHz 的频移, 对应于每周期 0.53 π 的载波包络相移. 飞秒激光脉冲载波包络相移测量的实现对于进一步利用电子反馈系统精确控制载波包络相移, 从而得到高稳定的飞秒激光频率梳具有重要意义.

关键词: 载波包络相移, 光子晶体光纤, 飞秒, 超连续

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

1. 引 言

近年来, 随着飞秒激光脉冲的不断窄化和应用研究的不断深入, 测量并控制飞秒激光脉冲载波与包络之间的相位, 已经成为目前最前沿的研究内容之一, 并直接导致了频标测量学^[1-3] 和阿秒科学^[4-6] 的革命性进展. 其中, 前者利用的是飞秒激光在频域上的超宽频谱, 通过稳定腔长和载波包络相位从而得到超稳定的飞秒激光频率梳, 这一频率梳可以实现射频与光频的直接链接. 而后者实现的主要方法是利用能量达到焦耳量级、持续时间只包含几个光周期的飞秒脉冲与惰性气体的非线性作用产生高次谐波, 以此得到阿秒脉冲串, 在这一技术中作为抽运光的飞秒脉冲的载波包络相位不但影响到高次谐波的转换效率, 而且也影响到产生的阿秒脉冲的复现率.

飞秒激光脉冲中载波包络相位漂移最早由 Xu 等人于 1996 年提出, 并通过相干互相关测量对环形腔钛宝石飞秒激光在腔内运行一周所引起的这种漂移给出了简单的估算^[7]. 1999 年, Telle 等人又进一步提出了几种测量载波包络相移的技术^[8], 其核心

思想都是相干外差频率测量, 基本方法是先通过差频和频或倍频等非线性频率变换得到两个频率相近的光脉冲, 相干叠加后实现载波包络相移的拍频测量. 其中最简洁易行的是自参考测量法, 在假设足够宽的频谱范围的条件下, 这种方法只需要采用一次非线性过程对频率梳中的低频分量进行二倍频, 然后再与频率梳中具有相同频率的高频分量进行相干叠加, 就可以通过拍频获得载波包络相移的信息. 目前自参考技术已经被国际上几个课题组所采用并成功地实现了飞秒脉冲载波包络相移的测量与控制^[9-12]. 本文利用自建的 18fs 锁模掺钛蓝宝石激光器输出的飞秒脉冲作为种子, 在光子晶体光纤中所产生的宽带超连续光谱的基础上, 采用自参考测量法进行了飞秒激光脉冲载波与包络之间相位漂移(carrier-envelope phase offset, CEO) 的实验研究.

2. 理论分析

2.1. 飞秒脉冲载波包络相移与频移

由锁模激光器所产生的飞秒脉冲在时域和频域上的结构分别如图 1(a) 和 (b) 所示. 对于腔长为 l_c 的锁模谐振腔, 所产生的飞秒脉冲序列中相邻激光

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60225005, 10227401, 60490280).

[†] E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

脉冲的时间间隔就是激光在腔内往返一周所用的时间,即 $\tau = l_c/v_g$, 其中 v_g 是群速. 由于腔内的色散, 通常群速和相速并不相等, 在脉冲每次往返后, 载波相对于包络的峰值位置会发生相位漂移. 设相邻脉冲间的相移为 $\Delta\phi$, 则有^[13]

$$\Delta\phi = 2\pi\omega_c \cdot l_c \cdot (1/v_g - 1/v_p), \quad (1)$$

式中 v_p 是腔内相速, ω_c 是载波频率. 对应的脉冲相移 $\Delta\phi$ 如图 1(a) 所示. 对某一个给定脉冲的整个载波包络相位, 如 $\Delta\phi \neq 0$, 则在不同脉冲之间载波包络相位显然是变化的.

如果所有脉冲相对于包络有相同的相位, 即 $\Delta\phi = 0$, 则频谱简单地由频率为重复频率整数倍的一系列梳谱线组成, 对应于图 1(b) 中虚线表示的梳谱位置. 然而由于腔内群速和相速之间存在着差异, 实际的情况并非如此, 而是不同脉冲之间存在一个载波包络相移. 这个相移在频域上就对应于一个相对于理想频梳的频率漂移

$$\delta = \Delta\phi f_{\text{rep}}/2\pi, \quad (2)$$

因此频梳中每个频率可以表示为

$$f_m = mf_{\text{rep}} + \delta, \quad (3)$$

式中 $f_{\text{rep}} = 1/\tau$ 是重复频率, 整数 m 可视为频梳谱线的标记, $\delta < f_{\text{rep}}$.

由此可见, 梳的位置与重复率的整数倍之间有一偏差为频率 δ , 它是由脉冲之间的相移决定的, 图 1(b) 示出了它们之间的关系, 实线代表有载波包络相移时周期飞秒脉冲序列所对应的频梳, 它与理想的虚线频梳之间有一个相对频移 δ .

2.2. 自参考测量法

从飞秒脉冲载波包络相移在时域和频域的对应关系 $\delta = \Delta\phi f_{\text{rep}}/2\pi$ 中可以看出, 只要在频域中测出 δ , 就可以算出时域中相邻脉冲的载波包络相移. 而频域中测量载波包络频移的方法很多, 其中自参考技术测量对于单个的飞秒激光振荡器而言是最方便的技术方法.

对于经光子晶体光纤展宽后的飞秒激光超连续谱, 设其某个高频和低频分量对应于图 1(b) 中最接近的频梳谱线数为 m 和 n , 则根据 (3) 式, 其低频分量在经过倍频晶体后产生的二次谐波频率为

$$2f_n = 2nf_{\text{rep}} + 2\delta. \quad (4)$$

将此二次谐波再与超连续中的高频分量相干叠加, 则可产生频率为

$$f = \pm(2f_n - f_m) = \pm[(2n - m)f_{\text{rep}} + \delta] \quad (5)$$

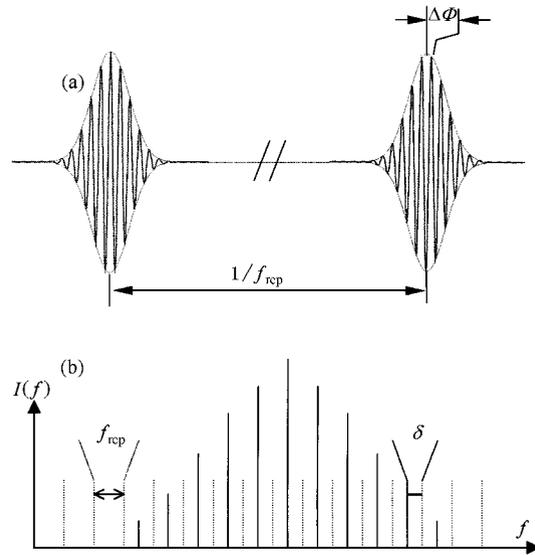


图 1 (a) 飞秒脉冲序列在时域的电场结构图 (b) 飞秒脉冲序列在频域对应的频率梳

的拍频信号, 如果选择 $2n \approx m$, 由此叠加后的拍频就是 $\delta f_{\text{rep}} + \delta f_{\text{rep}} - \delta$, 这样经过一次简单的倍频过程就可以实现载波包络频移的测量, 从而可以间接地算出载波包络相移值.

3. 实验装置

基于上述的自参考技术及载波包络相移与频移之间的关系原理, 我们实验测量了自建的飞秒钛宝石激光的载波包络相位漂移. 图 2 为实验装置图. 其中钛宝石激光器采用 X 型折叠腔, 腔内用一对棱镜进行色散补偿, 抽运源为二极管激光抽运的全固化倍频 Nd:YVO₄ 激光器, 中心波长是 532nm, 在 4.5W 的抽运功率下, 钛宝石激光器可输出平均功率 500mW 的锁模脉冲, 其中心波长为 800nm, 脉宽为 18fs, 重复频率为 87MHz. 为了扩展其光谱到大于一个光倍频程, 首先在腔外采用燕山大学提供的非均匀光子晶体光纤, 对钛宝石激光器输出的种子光脉冲产生的超连续进行了研究. 实验中用的光子晶体光纤纤芯为 2 μ m, 长度是 6cm, 为了产生超连续, 首先采用一 40 倍的显微物镜将种子光聚焦耦合到光子晶体光纤的纤芯中, 然后再用相同倍率的显微物镜对输出的超连续光进行准直.

实验中, 首先让种子光通过 2mm 厚的 BBO 倍频晶体产生二次谐波, 然后用分光镜(800nm 全透 400nm 全反)将倍频光与种子光分成两路, 由于倍频

光与种子光偏振方向互相垂直,所以采用 $\lambda/2$ 波片改变种子光的偏振.种子光经过光子晶体光纤后产生超连续光,其中包含 400nm 的光谱成分,为了将 400nm 光谱提取出来,让超连续光连续通过三片 400nm 的全反镜,其中后两片反射镜在同一导轨上组成延迟光路,最后再用分光镜(400nm 半透半反)将倍频光(400nm)与超连续光(400nm)相干叠加,叠加光束经过光栅衍射,并只让 400nm 的光通过小孔光阑进入光电倍增管,以提高探测信号的信噪比.将光电倍增管与射频频谱仪相连观察拍频信号.通过仔细调节导轨的时间延迟,使两路光在时间和空间上完全重合后,即可以观察到清晰的拍频信号.

在迄今报道的拍频实验中,所通用的方案是首先将种子光注入进光子晶体光纤以产生超连续光,然后再将超连续光分成两路,并将其中的一路进行倍频.与这种常规思路不同,我们采用了先倍频后产生超连续光的实验方案,由于直接从振荡器输出的种子光脉冲具有功率高、准直性好的特点,所以我们的设计不用加聚焦镜和准直镜即可以得到高效率的倍频光,不但节省了光学元件,而且结构更加紧凑,同时这种设计也简化了光子晶体光纤的调节,在调节光子晶体光纤时只要使超连续光谱中能包含 400nm 的紫光,而不用考虑 800nm 光谱的情况.这样调节的优点还避免了常规方案中由于超连续光的漂移而对倍频光的影响,有利于提高拍频测量的稳定性.

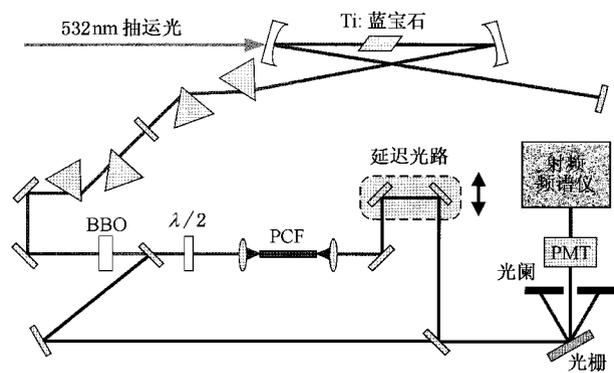


图2 实验装置图 BBO:倍频晶体;PCF:光子晶体光纤 $\lambda/2$:半波片,PMT:光电倍增管

4. 结果分析

我们用自建的钛宝石振荡器输出的飞秒种子脉冲通过光子晶体光纤后产生的超连续光谱如图3所示,由于所用光谱仪测量范围的限制,图中仅显示了从 400nm 到 800nm 的超连续谱成分.从图中可以看

出超连续光谱曲线的强度起伏比较大,这可能与所用光子光纤的非对称结构有关.事实上,只要所获得的光谱中同时包含有某一基波及与其相对应的二次谐波成分,也就是说光谱范围大于一个光倍频程,原则上都可以采用自参考技术测量飞秒脉冲载波包络相移引起的拍频信号.

在优化产生超连续光谱的基础上,我们用光电倍增管和射频频谱仪观察到飞秒脉冲载波包络相移引起的频移信号如图4所示,对应的频谱仪分辨率为 30kHz.图中 87MHz 的峰值对应的是锁模激光脉冲的重复频率,23MHz 的次峰即为两路光的拍频信号,测到的信噪比约是 30dB,对应着图1中飞秒激光频率梳的偏差.由方程(2)中飞秒脉冲载波包络相移与频率偏差的对应关系,可以算出 23MHz 的频移对应着时域中的载波包络相移是 0.53π ,这意味着此时钛宝石激光器的相位状态是每隔三个脉冲载波包络相位就会重复一次.实际中这个相移并不是固定不变的,受振荡器本身及外界环境的影响,载波包络相移随时间有很大的漂移,如果不加控制,漂移量最大可达几十 MHz,这对阿秒的产生以及频标的建立都有极大的影响.进一步利用电子伺服系统来稳定这个参量,并将每个光脉冲的载波包络相位都稳定在一个固定的值,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4中重复频率两边的两个峰值则分别代表重复频率与拍频的差频与和频.

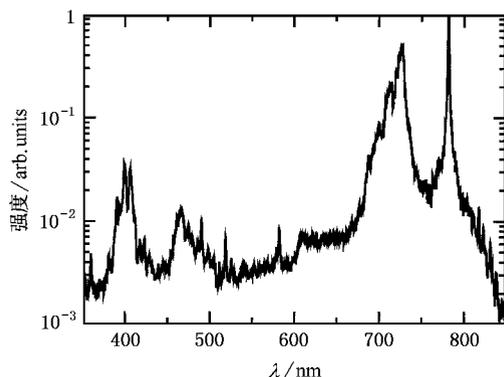


图3 光子晶体光纤产生的超连续光谱图

5. 结 论

我们在实验上首先利用非均匀光子晶体光纤获得了大于一个光倍频程的超连续光谱,在此基础上采用自参考测量技术,采用与现行方案不同的设置,建立了相干外差测量脉冲载波包络频移的实验光

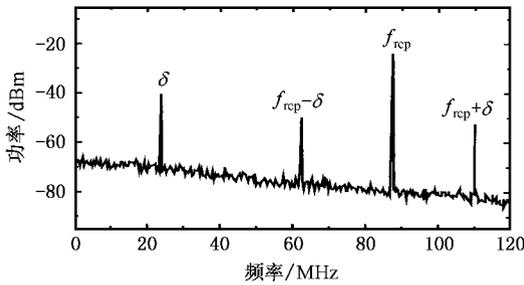


图4 光电倍增管探测到的载波包络相位漂移(CEO)的拍频信号. $\delta = 23\text{MHz}$ 对应于相邻脉冲有 0.53π 的 CEO

路,对自建的钛宝石飞秒激光器的载波包络相移进行了测量研究,在 4.5W 的 532nm 激光抽运下,对于所产生的 500mW 功率、 18fs 脉宽的光脉冲,纪录到了 23MHz 的频梳漂移,对应于每周期 0.53π 的载波包络相移,相应的信噪比为 30dB . 这一结果对于进一步实现稳定的飞秒频梳及光频合成提供了良好的前期基础.

感谢燕山大学侯蓝田教授及李曙光先生提供的非均匀光子晶体光纤.

- [1] Diddams S A *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
 [2] Udem Th *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4996
 [3] Holzwarth R *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **185** 2264
 [4] Hentschel M *et al* 2001 *Nature* **414** 509
 [5] Paul P M *et al* 2001 *Science* **292** 1689
 [6] Baltuška A *et al* 2003 *Nature* **421** 611
 [7] Xu L *et al* 1996 *Opt. Lett.* **121** 2008

- [8] Telle H R *et al* 1999 *Appl. Phys. B* **69** 327
 [9] Apolonski A *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 740
 [10] Jones D J *et al* 2000 *Science* **288** 635
 [11] Wei Z Y *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 2121
 [12] Yohei Kobayashi *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 856
 [13] Helbing F W *et al* 2002 *Appl. Phys. B* **74** (Suppl.) s3

Measurements of carrier-envelope-offset in the femtosecond Ti :sapphire laser^{*}

Han Hai-Nian^{1,2)} Wei Zhi-Yi^{1,2)} Zhang Jun¹⁾ Nie Yu-Xin^{1,2)}

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

²⁾ Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Received 7 January 2004 ; revised manuscript received 3 June 2004)

Abstract

It has been an increasing interest in the measurement and control of the carrier-envelope-phase offset (CEO) of femtosecond laser, which leads to an unprecedented progress in both fields of ultrafast laser techniques and frequency metrology. Based on the supercontinuum with a bandwidth of exceeding one octave, we measured and optimized the beat frequency signal by the self-reference technique. A frequency offset of 23MHz was observed for the Ti :sapphire laser with a power of 500mW and pulse width of 18fs ; it corresponds to the CEO of 0.53π . This work is a significant step toward coherent control of the femtosecond laser.

Keywords : carrier-envelope-phase, photonic crystal fiber, femtosecond, super-continuum

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

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60225005, 10227401 and 60490280).