

双光路测量红外飞秒激光脉冲的载波 包络相位稳定性^{*}

王建良 张春梅 宋立伟 冷雨欣[†]

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2008 年 7 月 15 日收到, 2008 年 10 月 17 日收到修改稿)

描述了利用双光路自参考技术测量红外飞秒脉冲载波包络相移的方法, 并通过建立的红外飞秒脉冲载波包络相移测量装置, 实验测量了自主搭建的可调谐光学参量放大系统输出的红外飞秒激光脉冲的载波包络相移. 对于 $1.6\ \mu\text{m}$ 的激光脉冲, 测量得到在 100 ns 内其相位抖动为 115 mrad (rms). 实验结果表明双光路法具有易于调节、测量方便、应用性强等优点.

关键词: 飞秒激光测量, 自参考技术, 双光路, 载波包络相位

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

1. 引言

近年来随着激光脉冲的不断窄化和应用研究的不断深入, 飞秒激光脉冲载波包络相位 (CEP) 控制在强场物理、非线性光学及频标领域有着越来越重要的应用^[1-4], 如高次谐波的产生、阿秒 X 射线的产生以及飞秒频疏测频、光钟等都需要载波包络相位稳定的飞秒激光脉冲. 载波包络相位稳定技术的发展使得在脉冲放大系统中产生 CEP 稳定的脉冲成为可能^[1], 同时也推动了脉冲 CEP 稳定性测量技术的发展^[5-10]. 测量载波包络相移 (CEO) 的方法主要是频域中的自参考测量技术, 又称 $f-2f$ 技术. 1999 年 Telle 等^[5]详细论述了该技术, 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.

对较低重复频率的激光放大器输出脉冲的载波包络相位移动的测量, 主要是利用放大器出射脉冲能量大以及多种类型的单发脉冲的特点的非线性光

谱干涉技术. 其目的主要是改进激光脉冲振荡器载波包络相位测量过程中的窄带测量方案, 从而实现对 $f-2f$ 拍频信号的宽带测量. 目前报道的方法主要采用的是单路共线 $f-2f$ 非线性干涉仪^[6,7], 这种结构调节难度大, 干涉条纹难以区分, 特别是对于不同波长入射脉冲的 CEP 稳定性测量的实用性较低. 而在双光路 $f-2f$ 干涉仪测量脉冲的 CEP 稳定性研究方面, 以往的工作一般采用入射脉冲首先分束后一束展宽光谱, 一束倍频, 再合束干涉的结构^[10,11], 但是这种先分束后展宽的结构不利于调节两光束在频域干涉的能量, 尤其对波长变化的可调谐光学参量放大 (OPA) 系统输出脉冲来讲更是难以调节.

在本文中, 我们在国内首次自行搭建了用于测量红外可调谐脉冲 CEP 稳定性的双光路 $f-2f$ 干涉仪, 并实际测量了自主搭建的可调谐 OPA 系统输出的红外 CEP 稳定的激光脉冲的载波包络相移. 实验证明在 100 ns 内对于 $1.6\ \mu\text{m}$ 波长的 OPA 输出闲置光脉冲载波包络相移的稳定性为 115 mrad, 同时可以方便测量其他波长脉冲的 CEP 稳定性. 此装置具有测量精度高, 易于调节等优点.

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB806001) 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KGCX-YW-417-2) 和上海市科委 (批准号: 07JC14055) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lengyuxin@siom.ac.cn

2. $f-2f$ 法测量载波包络相移的理论分析

锁模激光器所产生的飞秒脉冲在腔内振荡中, 由于腔内的色散, 通常群速和相速并不相等, 载波以相速度传播而包络以群速度传播, 载波相对于包络的峰值位置会发生相位漂移, 即载波包络相移^[12]. 单脉冲线偏振激光的电场随时间的变化可以表示为 $E_L(t) = A_L(t) \cos[\omega_L(t)t + \phi_{ce}]$. 该表达式中包括三个物理量, 振幅 $A_L(t)$, 电场振荡频率 $\omega_L(t)$ 以及载波包络相位 ϕ_{ce} . 出射脉冲链中每一个脉冲的 ϕ_{ce} 都不同, 且 ϕ_{ce} 随着脉冲链中的每一个脉冲以 $\Delta\phi_{ce}$ 的相移量变化.

当 $\Delta\phi_{ce} = 0$ 即 CEP 稳定时, 脉冲链的光谱由离散频率组成梳状结构, 而这些频率都是重复频率 $f_{rep} = 1/\tau$ 的整数倍, 其中 τ 是脉冲之间的时间间隔. 当 $\Delta\phi_{ce} \neq 0$, 频率表达式将变为 $\nu_m = mf_{rep} + \delta$, 其中 $\delta = -\Delta\phi_{ce} f_{rep}/2\pi$. 转化为角频率的表达式即为 $\omega_m = m\omega_{rep} + \omega_{ce}$, 其中 $\omega_{rep} = \frac{2\pi}{\tau}$ 是激光的重复频率, ω_{ce} 是相对于激光脉冲重复频率 ω_{rep} 整数倍的频移. 综上所述可得 $\Delta\phi_{ce} = 2\pi \frac{\omega_{ce}}{\omega_{rep}}$, 由此已知 ω_{rep} , 测得 ω_{ce} 便可计算出载波包络相移 $\Delta\phi_{ce}$.

$f-2f$ 自参考干涉技术中, 脉冲首先经过展宽得到足够宽的光谱. 此光谱分束后一部分经过倍频晶体, 超连续谱中的低频光倍频为高频光. 倍频之后的高频部分与未经倍频一路光谱中的高频部分, 产生拍频信号. 选择合适的频率即可得 $\omega_{ce} = \chi(n\omega_{rep} + \omega_{ce}) - (2n\omega_{rep} + \omega_{ce})$, 间接地测出载波包络相移 $\Delta\phi_{ce}$.

3. 双光路 $f-2f$ 实验装置

基于上述理论分析, 利用双光路 $f-2f$ 非线性干涉仪测量了自主搭建的可调谐 OPA 系统输出的红外闲置光脉冲载波包络相移. OPA 系统输出脉冲的 CEP 是被动稳定的, 输出波长调谐范围为 1.3—2.3 μm . 当在 6 mJ/40 fs/1 kHz 的抽运条件下, 能够在波长 1.6 μm 时输出脉冲宽度为 36 fs, 能量大于 1 mJ 的闲置光脉冲^[13].

测量装置光路如图 1 所示, 入射激光脉冲经过

衰减后首先经过透镜聚焦到 2 mm 厚白宝石上展宽光谱. 为了获得良好的展宽光谱, 必须对入射能量有着良好的控制, 一般在入射前光路中加入中性可变密度衰减片(VND)调节入射能量. 展宽光经分束片 1 分束, 透射光经延时器调节光程差, 反射光经 3 mm 厚 BBO 倍频晶体, 其中的低频部分得到倍频. 调节延时, 使两光束经分束片 2 后在光谱仪上观测到频域的干涉条纹. 由于 BBO 倍频效率较高, 为了调节两干涉光束中高频部分的能量, 两分束片均采用反射率为 4% 的白片. 在调节延时光路中加入半波片, 改变光的偏振方向, 调节分束后未经倍频光束的能量, 使展宽谱中的高频部分与倍频路中低频倍频后在同一偏振方向上的能量大致相当, 得到具有高对比度的干涉条纹.

为了证明得到的干涉条纹是所需要的 $f-2f$ 干涉条纹, 而不是其他表面反射等因素造成的自干涉条纹. 首先调节延时器两干涉光束的光程差不同, 干涉条纹的周期也随之变化, 证明是干涉条纹. 另在入射光路前插入 BK7 玻璃片, 能看到条纹的整体移动, 证明了 $f-2f$ 干涉条纹包含入射脉冲的 CEP 信息, 而不是表面反射等因素造成的自干涉条纹.

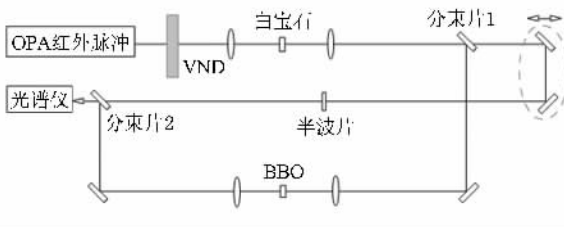


图 1 双光路 $f-2f$ 装置图 VND 为中性可变密度衰减片

4. 实验结果与分析

以 6 mJ/1 kHz 的抽运条件下 OPA 输出的 1.6 μm 波长的飞秒激光脉冲为例, 调节入射脉冲能量, 得到展宽光谱范围为 800 nm—2 μm . 其中的低频部分倍频后, 与原光谱中高频部分干涉. 调节半波片及倍频晶体, 控制倍频与展宽光谱中的高频部分能量大致相当, 在波长 880—920 nm 间得到具有良好对比度的干涉条纹. 采集测量 100 s 时间内的 100 个数据点, 通过傅里叶变换和滤波技术对数据进行处理^[14,15], 得到干涉图随时间演化的图样如图 2(a), (c) 所示. (c) 图为 100 s 时间 100 个数据点的干涉图, (a) 图为 100 s 时间内相位抖动图, 对相位抖动取均方根值(rms)得载波包络相移为 115 mrad.

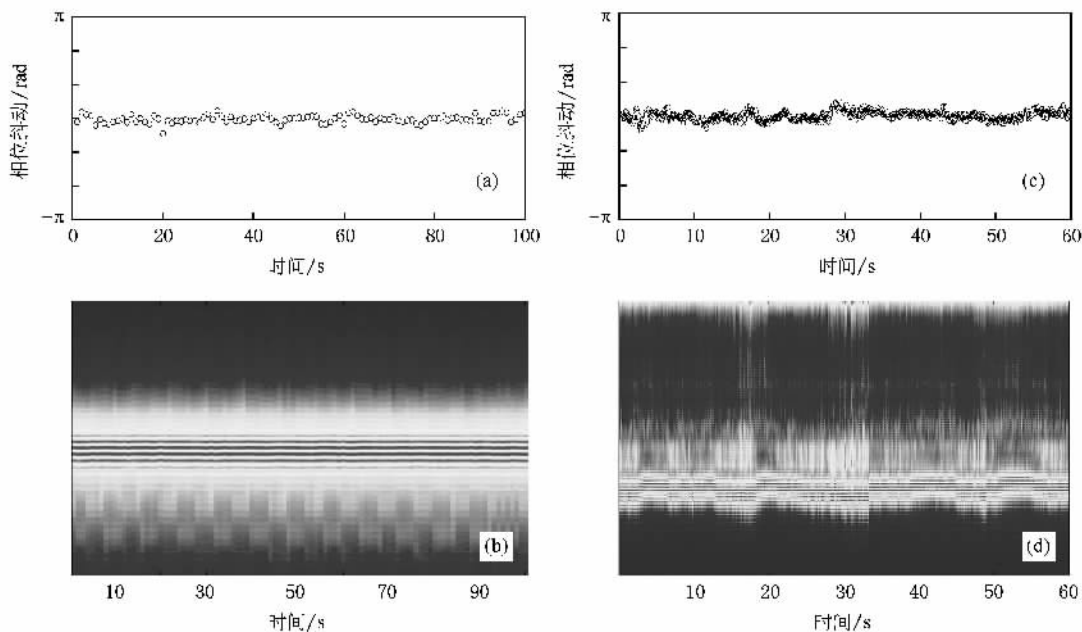


图 2 采 100 帧,曝光时间 1 ms,延迟 1 s,100 s 时间内的 CEP 抖动图(a)和 CEP 数据干涉图(b)及采 1000 帧,曝光时间 1 ms,无延迟,1 min 时间内的 CEP 抖动图(c)和 CEP 数据干涉图(d)

依据本 OPA 系统波长可调谐的特性,测量了其他中心波长输出脉冲 CEP 的稳定性.不同中心波长脉冲入射时,需调节 BBO 倍频晶体角度及 VND 衰减片调节能量,利用光谱仪在光谱干涉区域搜索到较清晰的干涉条纹即可,整个过程需要大约 10 min.如图 2(b)(d)所示,为 $1.9 \mu\text{m}$ 波长脉冲 1 min 内 CEP 的稳定情况,其相位抖动为 121 mrad.另分别测量了 1.7 和 $1.8 \mu\text{m}$ 波长脉冲 1 min 内 CEP 的稳定情况,其相位抖动分别为 275 和 208 mrad.从实验结果来看,在 OPA 系统输出比较稳定的波长 $1.6\text{--}2 \mu\text{m}$ 范围内,其 CEP 抖动小于 0.35 rad .这也充分证明了此系统可以在相当大的波长调谐范围内快速准确地测量脉冲 CEP 的稳定性.

测量结果表明飞秒脉冲 CEP 存在一定的抖动,其影响因素主要来自两个方面:一方面是 OPA 系统输出脉冲 CEP 的不稳定因素,也就是实际脉冲的 CEP 抖动;另一方面是 CEP 稳定性测量装置在测量过程中产生的 CEP 抖动,其中测量光束的能量稳定性对 CEP 的测量有着相当重要的影响^[16].在白宝石展宽光谱过程中,由克尔效应 $n(I) = n_0 + n_2 I$,群速度和相速度的不同又引入了 CEP 的移动,可表示为

$$\phi_{\text{ce}}^{\text{NL}} = \frac{\omega l_0 n_g}{c} - \frac{\omega l_0 n_p}{c} = \frac{\omega l_0}{c} \left(\frac{\partial n_0}{\partial \omega} + I \frac{\partial n_2}{\partial \omega} \right),$$

其中 ω 为光频率, l_0 为红宝石厚度,群速度 $n_g = n + \omega \text{d}n/\text{d}\omega$,相速度 $n_p = n$.此时入射脉冲能量的波

动 ΔI 引入的 CEP 的变化为 $\Delta \phi_{\text{ce}}^{\text{NL}} = \frac{\omega l_0}{c} \frac{\partial n_2}{\partial \omega} \Delta I$.本实验中,被测脉冲能量抖动约为 3%,根据文献[12],可估算其能量的抖动转化为相位的抖动为百 mrad 量级.在本系统中未采用光纤的另一原因是芯径较小,由于机械振动等因素而导致耦合效率变化较大,而采用块状白宝石光束指向性变化等外界因素对其影响较小,能够保证能量的稳定性.除能量外,CEP 稳定的脉冲产生和测量对外界环境要求较高,诸如机械振动可能带来光路的不稳定性,空气的流动可能导致两路的光程差的变化等这些因素都可能会对测量带来误差.这一方面的稳定性可以通过测量环境的改善来加以改进,实验装置测量结果也更精确.

综合得出,在对 $1.6 \mu\text{m}$ 飞秒激光脉冲的测量中,100 s 时间内测量得到脉冲的 CEP 抖动为 115 mrad,而脉冲能量的抖动约为 3%,由其导致的相位抖动噪声为百 mrad 量级.由此来看,在测量环境较好的情况下,短时间内 CEP 的抖动主要是由测量激光脉冲的不稳定性造成的.

5. 结 论

文中描述了自主搭建的双光路 $f\text{--}2f$ 非线性干涉仪装置,并用其测量了可调谐 OPA 系统输出脉冲在不同波长的载波包络相移.当 OPA 输出的飞秒脉

冲波长在 1.6 μm 时,测量得到在 100 s 时间内脉冲的 CEP 抖动为 115 mrad,并可以方便地测量其他波长脉冲的 CEP 稳定性.同时对双光路 f — $2f$ 脉冲 CEP 稳定性测量的理论基础和测量结果进行了分析.实验表明,相比其他测量方式,如单光路 f — $2f$

非线性干涉仪等,对于宽带可调谐飞秒脉冲 CEP 稳定的测量双光路装置具有调节方便,应用性和实时性较强等优点,为进一步的飞秒脉冲载波包络相位控制研究奠定了良好的基础.

[1] Baltuška A , Udem T , Uiberacker M , Hentschel M , Goulielmakis E , Gohle C , Holzwarth R , Yakovlev V S , Scrinzi A , Hänsch T W , Krausz F 2003 *Nature* **421** 611

[2] Zeng Z N , Li R X , Yu W , Xu Z Z 2003 *Phys. Rev. A* **67** 013815

[3] Hentschel M , Kienberger R , Spielmann C , Reider G A , Milosevic N , Brabec T , Corkum P , Heinzmann U , Drescher M , Krausz F 2001 *Nature* **414** 509

[4] Diddams S A , Hollberg L , Ma L S , Robertsson L 2002 *Opt. Lett.* **27** 58

[5] Telle H R , Steinmeyer G , Dunlop A E , Stenger J , Sutter D H , Keller U 1999 *Appl. Phys. B : Lasers Opt.* **69** 327

[6] Baltuška A , Fujii T , Kobayashi T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 1339011

[7] Kakehata M , Takada H , Kobayashi Y , Torizuka K , Fujihara Y , Homma T , Takahashi H 2001 *Opt. Lett.* **26** 1436

[8] Yang W F , Song X H , Gong S Q , Cheng Y , Xu Z Z 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 133602

[9] Han H N , Zhao Y Y , Zhang W , Zhu J F , Wang P , Wei Z Y , Li S Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2756 (in Chinese)[韩海年、赵研英、张 炜、朱江峰、王 鹏、魏志义、李师群 2007 物理学报 **56** 2756]

[10] Baltuška A , Uiberacker M , Goulielmakis E , Kienberger R , Yakovlev V S , Udem T , Hänsch T W , Krausz F 2003 *IEEE J. Select. Topics Quan. Electron.* **9** 972

[11] Manzoni C , Polli D , Cirimi G , Brida D , de Silvestri S , Cerullo G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 171111

[12] Cundiff S T 2002 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **35** R43

[13] Zhang C M , Wang J L , Wei P F , Song L W , Li C , Kim C J , Leng Y X 2009 *Chin. Phys. B* **4** 1469

[14] Lepetit L , Chériaux G , Joffre M 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2467

[15] Albrecht A W , Hybl J D , Gallagher F S M , Jonas D M 1999 *J. Chem. Phys.* **111** 10934

[16] Li C , Moon E , Wang H , Mashiko H , Nakamura C M , Tackett J , Chang Z 2007 *Opt. Lett.* **32** 796

Measurement of the carrier-envelope phase stability of infrared femtosecond laser pulses by two-path interferometer^{*}

Wang Jian-Liang Zhang Chun-Mei Song Li-Wei Leng Yu-Xin[†]

(*State Key Laboratory of High Field Laser Physics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics ,
Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

(Received 15 July 2008 ; revised manuscript received 17 October 2008)

Abstract

We describe a self-referencing two-path interferometer designed to measure the carrier-envelope phase stability. In experiment , we measure the carrier-envelope phase (CEP) stability of a home-made infrared tunable OPA laser pulses with the self-referencing two-path interferometer. When the wavelength of the incident pulses is $1.6 \mu\text{m}$, the CEP fluctuation is 115 mrad (rms) in 100 seconds. The interferometer can provide an accurate and quick measurement of the pulse CEP.

Keywords : femtosecond pulse measurement , self-reference technique , two-optical-path , carrier-envelope phase

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

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB806001) , the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KG CX-YW-417-2) , and the Shanghai Commission of Science and Technology , China (Grant No. 07JC14055) .

[†] Corresponding author. E-mail : lengyuxin@siom.ac.cn