

少数周期光脉冲的初始载波包络相位的测量

许荣杰^{1,2}, 白 亚², 宋立伟², 刘 鹏^{1,2}

- (1. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092;
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:提出了利用空气成丝产生的太赫兹波测量少数周期激光的初始载波包络相位(CEP)的方法。空气等离子体产生的太赫兹波形的演变可以用来探测传播中的少数周期激光的载波包络相位的变化。在少数周期强激光场,太赫兹波形反转的数目和反转位置都有规律地依赖于少数周期激光的载波包络相位。利用光电流模型的计算结果表明,在适中的能量范围内,对于所有的初始 CEP,太赫兹波形反转点数目是两个或者一个,且在不同输入能量下,总是在初始 CEP 为 0.5π 时,太赫兹波形的两个反转点变为一个反转点。这可以提供准确测量驱动激光场初始 CEP 的方法。

关键词: 载波包络相位; 少数周期脉冲; 太赫兹波辐射; 等离子体

中图分类号: O4-34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2112-04

Determination of initial carrier-envelope phase of few-cycle optical pulses

Xu Rongjie^{1,2}, Bai Ya², Song Liwei², Liu Peng^{1,2}

- (1. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Using the THz emission from air plasma, the method of determining the initial carrier-envelope phase (CEP) of few-cycle pulses was proposed. In air plasma, the evolution of the generated THz waveform can be used to probe the variation of the CEP of propagating intense few-cycle pulses. In the intense few-cycle laser fields, the inversions position and the number of inversions of the THz waveforms was found dependent on the initial CEP regularly. The calculation based on the transient photocurrent model indicates that the number of inversions of the THz waveforms is either two or one for all the initial CEP for a range of moderate input pulses energies. Under varied input pulse energies, the value of initial CEP is 0.5π constantly when the two inversions of the THz waveforms change to one. This provides a method of measuring the initial CEP of the driving few-cycle pulses.

Key words: carrier envelope phase; few-cycle pulses; THz emission; plasma

收稿日期: 2013-11-09; 修订日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274326, 60978012, 11134010, 11127901); 国家 973 课题(2011CB808103)

作者简介: 许荣杰(1983-), 女, 博士生, 主要从事太赫兹方面的研究工作。Email: xurongjie1314@163.com

导师简介: 刘鹏(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事超快强激光场中分子动力学研究, 包括分子产生高次谐波、分子转动和强场分子相互作用新特性和太赫兹方面的研究工作。Email: peng@siom.ac.cn

0 引言

只包含几个载波振荡周期的超短激光脉冲可称为周期量级激光脉冲或少数周期激光脉冲。载波包络相位(CEP)是周期量级激光脉冲非常重要的参量,是周期量级脉冲包络最大值和包络下电场振荡最大值之间的相对相位。在强激光场范围,周期量级 CEP 稳定的超短激光脉冲已经成功地应用在阿秒脉冲的产生和分子解离电离动力学的操纵^[1-6]。CEP 是重要的激光参数,可以用来调制激光脉冲的电场以及和介质相互作用的结果^[7]。为了稳定和控制 CEP,测量 CEP 的准确值变为非常关键。目前较成熟的测量少数周期脉冲的 CEP 的方法有立体-阈上电离方法,测量沿着激光偏振的两个相反方向的电子并且将截止电子的非对称性与 CEP 相关联^[8]。另一个方法是探测少数周期强激光场驱动产生的空气等离子体辐射的太赫兹,基于与 CEP 相关的轨道电离的非对称性来测量 CEP^[9]。然而,这些方法的目的是测量激光场与探测介质相互作用处的局部激光场的 CEP,忽略了相互作用过程中 CEP 的相移。

对于周期量级强激光场,在线性聚焦的条件下,Gouy 相移和衍射主导 CEP 的变化^[10]。例如,如果考虑半高全宽为 8 fs,光束直径为 8 mm 的少数周期激光经焦距为 200 mm 的透镜聚焦在非线性介质,因为介质的色散以及等离子体作用,CEP 的相移变得复杂。以氮气分子(峰值压强为 $1.333\ 22 \times 10^4$ Pa,厚度为 1 mm)为例,被少数周期强激光场电离,依据参考文献[11]的传输方程计算得到在不同脉冲输入能量下相互作用长度内的 CEP 相移分别为 1.37 rad 和 1.93 rad(脉冲能量为 36 μ J、46 μ J)。当增加脉冲能量时,CEP 的相移值会增加。在线性聚焦条件下强激光场与介质在瑞利长度内相互作用时,产生的 CEP 相移使得准确测量某个位置处的 CEP 值变得困难。文中定义了一个描述少数周期脉冲的 CEP 准确值的初始 CEP 概念,它是在激光聚焦前的 CEP 值,可以避免因激光聚焦以及非线性效应引起的不确定性。

众所周知,由于包含 Gouy 相移和脉冲前沿变化的传播效应的影响,少数周期激光脉冲的 CEP 发生相移,空气等离子体辐射的太赫兹的波形发生极性的反转^[12]。当测量初始 CEP 的值时需要考虑等离子体中的 CEP 相移变化,但是 CEP 的相移随脉冲能量

而改变,所以不能在实验中预先确定初始 CEP 的准确值。文中,笔者发现太赫兹波形的反转点数目和反转位置与少数周期激光场的初始 CEP 相关,基于此给出了测量初始 CEP 的方法。

1 实验结果与分析

1.1 实验结果

采用的实验装置为 CEP 稳定的周期量级近红外超短脉冲激光(中心波长为 1.8 μ m,半高全宽为 11 fs,脉冲最高能量为 0.46 mJ)^[13]。在实验中脉冲能量为 400 μ J 的激光光束经球面镜($f=150$ mm)聚焦到空气中形成大约 12 mm 长度的荧光光丝。安装在平移台上的薄钢片插入到光丝中去挡光丝,得到不同光丝长度下的太赫兹辐射,产生的太赫兹波形利用光电采样的平衡探测方法探测。图 1 显示了不同等离子体长度下的太赫兹波形。提取出图 1(1 ps 处的最大值)沿等离子体方向的太赫兹幅度,画在图 2,可以看

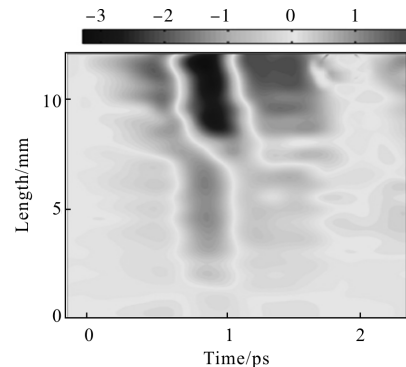


图 1 测量到的少数周期激光场不同等离子体长度下的太赫兹波形

Fig.1 Measured THz waveforms as a function of plasma length by few-cycle laser fields

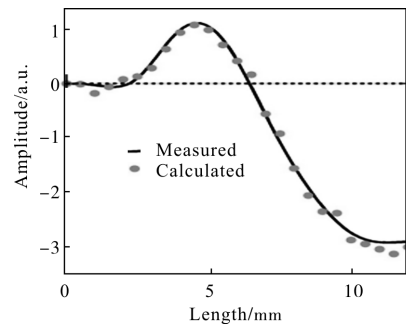


图 2 从测量到的图 1 中的 1 ps 时间处提取的和计算得到的不同等离子体长度下的太赫兹幅度

Fig.2 Measured and calculated results of THz amplitudes taken from Fig.1 at the time of 1 ps, as a function of the position in the filament

到,太赫兹波形有两个反转点,第一个反转出现在接近 2 mm 的位置,太赫兹波形的极性由负极性变为正极性,第二个反转在接近 6.5 mm 的位置,太赫兹波形的极性由正极性又变为负极性。

1.2 理论分析

利用光电流模型计算少数周期强激光场产生的等离子体中的太赫兹辐射^[14-15],关注在不同等离子体长度下的太赫兹波形反转数目和反转位置。色散介质中的少数周期强激光场可以被参考文献[11]中的轴对称的传播方程描述,其中考虑了衍射、色散、克尔效应和空气轨道电离产生的光电子的偏振极化。轨道电离电子的运动会导致方向性的非线性光电流产生^[16],

$$\partial_t J_e(r, z, t) + v_e J_e(r, z, t) = \frac{e}{m} \rho_e(r, z, t) E(r, z, t) \quad (1)$$

式中: v_e 、 e 、 m 和 ρ_e 分别代表电子离子的碰撞率、电子的电量、电子的质量、电子的密度; r 为径向空间的长度。

产生于等离子体的太赫兹辐射可以被描述为在等离子体中传播的驱动产生的瞬态光电流的远场辐射的积分^[17]

$$E_{\text{THz}}(r', t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{1}{cR} \partial_t J_e(r, z, t_r) d^3r \quad (2)$$

计算中使用高斯光束的初始驱动激光场,波长 1.8 μm ,脉冲宽度为 11 fs,脉冲能量为 400 μJ 。通过最优化驱动少数周期激光场的初始 CEP,计算得到在 $\varphi_0=0.4\pi$ 时不同光丝长度下的太赫兹幅度与实验结果一致,如图 2 中的线所示。

在少数周期脉冲初始 CEP 为 $\varphi_0 = 0, 0.2\pi, \dots, 1.0\pi$ 和 1.2π 时,不同光丝长度下的太赫兹幅度,如图 3 所示。图中显示在大多数 CEP 下,等离子体中产生的太赫兹辐射只是有一个反转点。随着 CEP 值的逐渐增加,反转位置会逐渐移向光丝的起始端,而且在光丝的尾部会出现第二个反转点,例如在 CEP 为 $\varphi_0=0.2\pi$ 和 $\varphi_0=0.4\pi$ 情况。在 $\varphi_0=0.4\pi$ 之后,光丝前段的反转点会消失在光丝的起始端,变为只有一个反转点,例如 $\varphi_0=0.6\pi$ 时,光丝前端的反转点消失,太赫兹辐射只是在光丝的后半端有一个反转点。

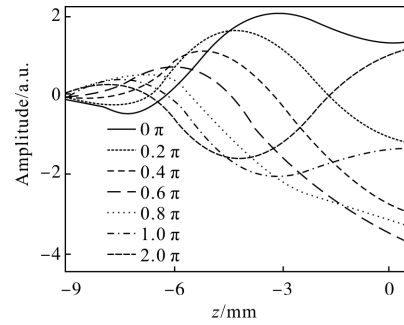


图 3 计算得到的少数周期脉冲在不同初始 CEP, φ_0 为 $0, 0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, 1.0\pi, 1.2\pi$ 不同光丝长度下太赫兹幅度
Fig.3 Calculated THz amplitude as a function of plasma length by the few-cycle pulses with initial CEP of $\varphi_0: 0, 0.2\pi, 0.4\pi, 0.6\pi, 0.8\pi, 1.0\pi, 1.2\pi$

为了更好地表明太赫兹波形反转点位置和初始 CEP 的关系,以 0.1π 的 CEP 间隔将不同 CEP ($0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$) 下反转点的位置画在图 4(a) 中。图中显示,在 CEP 为 $0 \leq \varphi_0 \leq \pi$ 时,从 $\varphi_0=0.5\pi$ 开始,在光丝前段的第一个反转点消失,太赫兹辐射的反转点由两个变为一个。为了验证这个现象是否依赖能量,继续增加能量到 500 μJ ,如图 4(b) 所示,可以看到,当 $\varphi_0=0\sim 0.4\pi$ 时太赫兹辐射有两个反转点,与输入能量为 400 μJ 时在 $\varphi_0=0.2\pi\sim 0.4\pi$ 有两个反转点相比,出现双反转时的 CEP 发生扩展。然而值得注意的是,从 $\varphi_0=0.5\pi$ 开始,仍然在光丝前段的第一个反转点消失,太赫兹辐射的反转点由两个变为一个,与 400 μJ 时太赫兹辐射第一反转点消失的规律一致。

依据参考文献[11]中的传输方程计算等离子体中 CEP 的相移,如图 5 所示,是沿光丝方向的太赫兹辐射出现反转的原因之一。可以看到在光丝的中部和尾部,明显的 CEP 增加和下降(隆起结构)导致了反转极性的太赫兹辐射的产生,从而使积分后的太赫兹辐射显示极性反转现象。当激光脉冲的能量增加,等离子体中的 CEP 相移变得大于 π ,如果第一个反转点出现在光丝的起始端,太赫兹辐射第二个反转点可能会出现在光丝的尾部,如图 4(a) 和 (b) 所示。

在 CEP 为 $\varphi_0=0.5\pi$, 太赫兹波形的反转点消失在等离子体前端,并且不依赖能量变化,这个现象提供了判定少数周期激光的初始 CEP 的方法。

当脉冲输入能量为 270 μJ ,如图 4(c) 所示,显示在所有 CEP 下,沿光丝方向太赫兹辐射都只有一个反转点。当 CEP 为 $0 \leq \varphi_0 \leq \pi$, 太赫兹反转点位置会

逐渐移向光丝的前端,在 $\varphi_0=0.5\pi$ 时太赫兹反转点消失在光丝的起始端,同时在光丝的尾部出现了新的反转点。在适当的输入脉冲能量下,可以依据这一现象更加简易的判定 $\varphi_0=0.5\pi$ 时的 CEP。

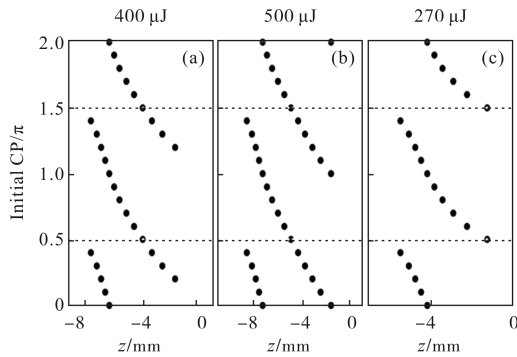


图 4 计算得到的以 0.1π 为间隔的不同初始 CEP 下,不同脉冲能量时,沿等离子体的太赫兹波形反转点位置

Fig.4 Calculated inversion positions of THz waveforms as a function of the initial CEP φ_0 changing in a step-size of 0.1π , at the energy of $400 \mu\text{J}$, $500 \mu\text{J}$, $270 \mu\text{J}$ respectively

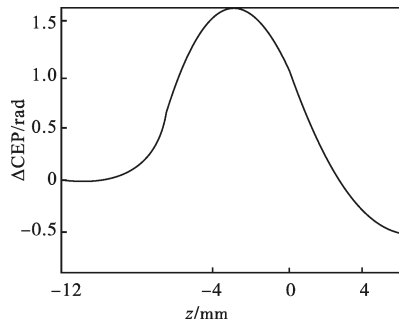


图 5 激光场在空气等离子体中的 CEP 相移
Fig.5 CEP shift of the laser field in air plasma

所以,基于太赫兹反转的规律,笔者提出了判定少数周期激光的初始 CEP 的方法。通过 CEP 稳定的少数周期脉冲实验得到的太赫兹波形,依据太赫兹波形反转位置在 $\varphi_0=0.5\pi$ 时太赫兹反转点消失在光丝的起始端现象,判定 $\varphi_0=0.5\pi$ 的 CEP 值,然后依据不同 CEP 下太赫兹波形反转位置的变化规律判定其他的 CEP 值。

2 结论

文中研究了少数周期强激光场产生的空气等离子体中的太赫兹辐射的反转特征。太赫兹波形的反转数目和反转位置依赖于激光脉冲的初始 CEP。在

较适中的驱动脉冲输入能量时,对于所有初始 CEP,太赫兹反转点数目是两个或者一个,反转点数目转换具有很小的能量依赖性,从而可以用来确定 CEP 值,基于瞬态光电流模型的计算,表明 CEP 在 $\varphi_0=0.5\pi$ 时,太赫兹波的反转点消失在光丝的起始端,两个反转点变为一个反转点,这提供了精确测量少数周期激光脉冲的初始 CEP 的方法。

参考文献:

- [1] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann Ch, et al. Attosecond metrology [J]. *Nature*, 2001, 414 (6863): 509–513.
- [2] Krausz M F, Ivanov M. Attosecond physics [J]. *Rev Mod Phys*, 2009, 81(1): 163–234.
- [3] Ferrari F, Calegari F, Lucchini M, et al. High-energy isolated attosecond pulses generated by above-saturation few-cycle fields [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 875–879.
- [4] Wei Zhiyi, Wang Zhaohua, Han Hainian, et al. Progress on ultrashort and ultraintense laser pulse technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 773–777. (in Chinese)
魏志义,王兆华,韩海年,等.超短及超强脉冲激光研究进展[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(6): 773–777.
- [5] Roudnev V, Esry B D, Ben-Itzhak I. Controlling HD^+ and H_2^+ dissociation with the carrier-envelope phase difference of an intense ultrashort laser pulse [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93 (16): 163601.
- [6] Kling M F, Ch Siedschlag, Verhoef A J, et al. Control of electron localization in molecular dissociation [J]. *Science*, 2006, 312(5771): 246–248.
- [7] Baltuska A, Udem T, Uiberacker M, et al. Attosecond control of electronic processes by intense light fields [J]. *Nature*, 2003, 421(6923): 611–615.
- [8] Wittmann T, Horvath B, Helml W, et al. Single-shot carrier-envelope phase measurement of few-cycle laser pulses [J]. *Nat Phys*, 2009, 5(5): 357–362.
- [9] Kre M, Lffler T, Thomson M D, et al. Determination of the carrier-envelope phase of few-cycle laser pulses with terahertz-emission spectroscopy [J]. *Nat Phys*, 2006, 2(5): 327–331.
- [10] Porras M A. Diffraction effects in few-cycle optical pulses [J]. *Physical Review E*, 2002, 65(2): 026606.