圆偏振周期量级红外激光脉冲驱动产生太赫兹辐射

宋立伟,白 亚,许荣杰,李 闯,刘 鹏,李儒新,徐至展

(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)

摘 要:研究了周期量级的圆偏振激光在空气中成丝产生太赫兹辐射的偏振特性。将中心波长1.8μm、 脉宽 8.6 fs 的圆偏振红外激光脉冲聚焦到空气中,形成等离子体细丝,产生太赫兹辐射。通过测量太 赫兹辐射的偏振状态,和偏振方向与驱动激光载波-包络相位的关系,发展太赫兹波偏振控制的方 法。实验结果表明,太赫兹辐射为椭圆偏振,而且偏振平面随着驱动激光载波-包络相位的变化而转 动。这对太赫兹波的偏振控制有重要意义,并为周期量级激光载波-包络相位的测量提供了新方法。 关键词:偏振; 周期量级激光脉冲; 太赫兹波

中图分类号:TN21 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)09-2925-04

Terahertz emission from air plasma produced by few-cycle circularly polarized laser pulses

Song Liwei, Bai Ya, Xu Rongjie, Li Chuang, Liu Peng, Li Ruxin, Xu Zhizhan

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

Abstract: The polarization characters of terahertz emission from air plasma produced by few cycle circularly polarized laser pulses were studied. Terahertz waves were generated from the air plasma produced by focusing the 8.6 fs circularly polarized laser pulses into the air. By measuring the polarization of terahertz waves and the relationship between the polarization and the carrier-envelope phase of driving laser, new methods for terahertz polarization control were developed. The terahertz emission was measured to be elliptically polarized, and its polarization rotated with the carrier-envelope phase of driving laser. This is useful for terahertz polarization control and provides a way to measure the carrier-envelope phase of few-cycle laser pulses in the air.

Key words: polarization; few-cycle laser pulses; terahertz waves

收稿日期:2014-01-09; 修订日期:2014-02-12

基金项目:国家自然科学基金(61308022,11274326,11127901,11134010);上海市自然科学基金(13ZR1463200) 作者简介:宋立伟(1983),男,副研究员,主要从事超短脉冲激光的产生及应用方面的研究。Email:slw@siom.ac.cn

0 引 言

近年来,太赫兹波在光谱测量学、生物医学、反恐 检测等领域中已经有了广泛的应用印。利用激光在空 气中成丝驱动产生太赫兹辐射是远程产生宽光谱太 赫兹波的重要手段[2-5]。过去二十年中,人们将各种激 光脉冲聚焦到空气中来产生太赫兹波,其中包括:线 偏振多周期单色激光脉冲和双色激光脉冲⁶⁶,圆偏振 多周期单色激光脉冲和双色激光脉冲[7-3],线偏振少周 期单色激光脉冲¹⁹等。由于驱动激光不同,它们在空气 中成丝所产生的太赫兹辐射也表现出不同的特性。例 如,由线偏振多周期双色激光脉冲在空气中成丝产生 的太赫兹辐射,其波形和幅度受双色激光场之间的相 位差调制,而其偏振由双色激光场的偏振控制。线偏 振的少周期激光脉冲成丝产生的太赫兹波波形与驱 动激光的载波-包络相位有关^[10],因此,通过测量太赫 兹波的波形可以判断驱动激光的载波--包络相位¹⁹,这 对于阿秒科学研究具有重要意义。Wu 等人^{III}对于圆 偏振少周期激光场在空气中成丝驱动产生太赫兹辐 射进行了数值模拟研究,结果表明,圆偏振周期量级 激光成丝产生的太赫兹波的偏振方向与驱动激光的 载波-包络相位有关,其偏振平面随着载波-包络相位 的变化而转动。这对于产生偏振可控的太赫兹辐射和 判断激光的载波-包络相位都具有重要意义。然而,迄 今为止并未见到这方面的实验研究。

1 实验装置

笔者建造了一套圆偏振周期量级红外激光脉冲 产生装置,并针对周期量级圆偏振激光脉冲在空气中 成丝产生的太赫兹辐射的偏振特性进行实验研究。研 究显示,周期量级圆偏振激光在空气中成丝产生的太 赫兹波是椭圆偏振的,而且,椭圆的主轴方向随着驱 动激光的载波-包络相位的变化而转动。这一结果印 证了 Wu 等人的结论,提供了一种产生偏振可控的太 赫兹辐射的机制,也为周期量级激光脉冲载波-包络 相位的测量提供了更加简捷和直接的方法。

实验装置如图 1(a)所示:基于商品化钛宝石激 光器(Coherent Elite-HP-USX,单脉冲能量 5 mJ,脉 宽 25 fs,中心波长 800 nm,重复频率 1 kHz),笔者搭 建了三级光参量放大系统^[12],其中,QWP 为四分之 一波片;CM1,2 为凹面镜;M 为平面镜;FSW 为融石 英楔板;PP 为聚乙烯平板。光参量放大系统输出激 光中心波长为1.8 μm,单脉冲能量约0.95 mJ,脉冲 宽度 40 fs。利用四分之一波片将激光由线偏振变为 圆偏振,并注入充有氙气的空心光纤中。经过光纤中 的自相位调制效应,激光光谱被展宽,覆盖了1.3~ 2.1 μm,可以支持 7.9 fs 的激光脉冲。通过在光路中 插入一对石英楔板,激光的色散得到补偿。最终,由自 建 SHG-FROG 测量的激光脉宽为 8.6 fs, 小于 1.5个 光周期。由于参量过程的闲置光载波-包络相位被动 稳定[13],最终输出的周期量级激光的载波--包络相位 的抖动控制在约 500 mrad。激光的偏振由格兰棱镜 和功率计测量。转动格兰棱镜,透射激光功率的变化 量小于 5%, 表明激光是近似圆偏振。用焦距 15 cm 的凹面镜将350 µJ的圆偏振周期量级激光脉冲聚 焦到空气中,产生长8mm的细丝。在光丝后方,用 1 mm 厚的聚乙烯平板挡住激光, 使太赫兹波透射。 利用太赫兹偏振片 (Tydex Inc.) 和太赫兹功率计 (Gentec THZ1.5B-MT-USB)对太赫兹波的偏振进行 测量。当太赫兹偏振片放置在某一方向时,采用光电 平衡取样探测得到的太赫兹波形如图 1(b)所示。变 换至频域,光谱可以覆盖1~10 THz。





2 实验结果及分析

太赫兹波偏振的测量结果如图 2 所示。从图中 可以看出,太赫兹波强度(*I*)和偏振方向(θ)符合 $I=a^2\cos^2\theta+b^2\sin^2\theta$ 的表达公式,其中a、b为常数。因 此,太赫兹辐射是椭圆偏振的,它的长短轴分别为 2b和 2a,太赫兹电场 $Etx=a\cos\theta, Ety=b\sin\theta$ 。令 θ 在 0~2 π 之间变化,测量得到的最大功率(1.36 mW)和 最小功率(0.22 mW)表明椭圆偏振电场长短轴之比: b/a=(1.36/0.22)^{1/2}=2.48。



图 2 太赫兹辐射的偏振状态 Fig.2 Polarization of the THz waves

载波-包络相位是周期量级超短激光脉冲的重 要参数,在电离实验中起着至关重要的作用。在周期 量级圆偏振激光成丝产生太赫兹辐射的过程中, 激光的载波-包络相位与太赫兹偏振的关系可以用 光电流模型来解释^[14]。圆偏振激光的电场可以写 成: $Ex=E_0(t)\cos(\omega t+\varphi), Ey=E_0(t)\cos(\omega t+\varphi-\pi/2),$ 其中 $E_0(t)$ 是振幅包络, ω 是电场振动频率, φ 是激光的 载波-包络相位,随着 φ 的变化电场在传播方向上 转动。

图 3 表明了当载波-包络相位为0和 π/2 时,



图 3 载波-包络相位为 0 和 π/2 时,8.6 fs 激光脉冲的电场 (实线)和电离率(虚线)

Fig.3 Electric field (solid line) of 8.6 fs laser pulses and the ionization rate (dotted line), when the CEP is set to 0 and $\pi/2$

8.6 fs 圆偏振激光的电场(实线)和电离率(虚线)(其中,图(c)、(d)为从(0,0,1)平面观察(a)、(b)的平面 图)。根据电场的旋转不变性,可以得出,当激光载 波-包络相位变化时,辐射出的太赫兹波振幅不变, 而偏振方向以传播方向为轴发生转动。

实验上,通过改变图1中石英楔板(FSW)的插入 量来改变圆偏振周期量级激光的载波-包络相位,当 激光场的载波-包络相位从0变化到π时,太赫兹波 的偏振平面转动一周,而太赫兹波的振幅保持不变。

3 结 论

综上,文中实验上测量了1.5个光周期的圆偏振 激光脉冲成丝产生太赫兹辐射的偏振状态。通过改变 驱动激光的载波-包络相位,使太赫兹波的偏振方向 沿传播方向转动。这一结果一方面可用于远程产生偏 振方向可控的宽光谱太赫兹辐射,另一方面为测量周 期量级激光的绝对相位提供了便捷的途径。

参考文献:

- Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Phonton, 2007, (1): 97–105.
- Hamster H, Sullivan A, Gordon S, et al. Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1994, 49(1): 671–677.
- [3] Ferguson B, Zhang X -C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Mater*, 2002(1): 26–33.
- [4] Liu Y, Houard A, Prade B, et al. Terahertz radiation source in air based bifilamentation of femtosecond laser pulses [J].
 Phys Rev Lett, 2007(99): 135002.
- [5] Liu J, Dai J, Chin S, et al. Broadband terahertz wave romote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases [J]. *Nature Photon*, 2010 (4): 627–631.
- [6] Xie X, Dai J, Zhang X –C. Coherent control of THz wave generation in ambient air [J]. *Phys Rev Lett*, 2006 (96): 075005.
- [7] Jahangiri F, Hashida M, Tokita S, et al. Directional elliptically polarized terahertz emission from air plasma produced by circularly polarized intense femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2011(99): 161505.
- [8] Dai J, Karpowicz N, Zhang X –C. Coherent polarization control of terahertz waves generated from two-color laser-

induced gas plasma[J]. Phys Rev Lett, 2009(103): 023001.

- [9] Kreβ M, Löffler T, Thomson M, et al. Determination of the carrier-envelope phase of few-cycle laser pulses with terahertz-emission spectroscopy [J]. *Nature Phys*, 2006 (2): 327–331.
- [10] Bai Y, Song L, Xu R, Li C, et al. Waveform-controlled terahertz radiation from the air filament produced by fewcycle laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2012(108): 255004.
- [11] Wu H, Meyer-ter-Vehn J, Sheng Z. Phase-sensitive terahertz emission from gas targets irradiated by few-cycle laser pulses

[J]. New J Phys, 2008(10): 043001.

- [12] Li C, Wang D, Song L, et al. Generation of carrier-envelope phase stabilized intense 1.5 cycle pulses at 1.75 μm [J]. Opt Express, 2011(19): 6783–6789.
- [13] Baltuška A, Fuji T, Kobayashi T. Controlling the carrierenvelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers[J]. *Phys Rev Lett*, 2002(88): 133901.
- [14] Kim K, Glownia J, Taylor A, et al. Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields [J]. Opt Express, 2007(15): 4577–4584.