

# 椭圆偏振太赫兹辐射偏振态的单发测量

肖一<sup>1,2</sup>, 白亚<sup>1,2\*\*</sup>, 刘鹏<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 利用超强超短激光光源中激光-等离子体的相互作用,能够产生毫焦耳量级高能量的太赫兹辐射,而这种条件下产生的太赫兹辐射通常是单发的。针对该类型太赫兹辐射提出一种单发测量方案:将太赫兹波分束,用两套独立校准的啁啾脉冲光谱编码探测装置,分别同时测量太赫兹电场在水平和垂直方向上的分量,最终得到太赫兹电场的偏振态。基于所提方案进行了实验验证,用单发测量原理得到了太赫兹辐射的偏振态。实验测得的椭圆度与模型分析吻合,验证了所提单发测量方案的可行性,为单发椭圆偏振太赫兹辐射偏振态的测量研究提供了新思路。

**关键词** 超快光学; 太赫兹辐射; 单发探测; 偏振态; 啁啾脉冲

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1114001

## Single-Shot Detection of Polarization State for Elliptically Polarized Terahertz Radiation

Xiao Yi<sup>1,2</sup>, Bai Ya<sup>1,2\*\*</sup>, Liu Peng<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Powerful terahertz (THz) radiation is generated by the interaction between laser and plasma of a super short laser source; such THz radiation is usually single-shot. Herein, we propose a single-shot measurement strategy that involves splitting the THz beam, measuring the THz radiation in the horizontal and vertical directions using two independent spectral detection systems with chirped pulses, and finally obtaining the polarization state. We perform a proof experiment based on this strategy and measure an elliptically polarized THz waveform via the single-shot method. Experimental results agree well with the model analysis, verifying the feasibility of our strategy in addition to providing a new plan for single-shot detection of the polarization state of elliptically polarized THz radiation.

**Key words** ultrafast optics; terahertz radiation; single-shot detection; polarization state; chirped pulse

**OCIS codes** 320.1590; 300.6495; 120.1880; 140.7090; 260.5430

## 1 引 言

太赫兹(THz)辐射在生物医学成像<sup>[1]</sup>、材料科学<sup>[2]</sup>、超快动力学研究<sup>[3]</sup>等领域都有着重要的应用。由于太赫兹辐射在振幅和相位上均对材料特性响应良好,因此针对其偏振态进行有效测量能够为上述应用研究提供有效手段。随着超强超短激光光源的

发展<sup>[4]</sup>,利用激光-等离子体的相互作用已经获得了毫焦耳量级高能量的太赫兹辐射<sup>[5-7]</sup>。但是受限于驱动光源的低重复频率甚至是单发输出方式,太赫兹辐射偏振态的相干测量目前仍存在巨大挑战。

基于相干测量的偏振检测方法主要有太赫兹波偏振片法<sup>[8]</sup>、空气-等离子体偏压电场法<sup>[9]</sup>、光电导天线法<sup>[10-12]</sup>和光弹调制器法<sup>[13]</sup>等。太赫兹波偏振

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-05-17; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(11874373)

\* E-mail: peng@siom.ac.cn; \*\* E-mail: pipbear@siom.ac.cn

片法通过太赫兹波偏振片,分别测量太赫兹电场在水平方向和竖直方向上的投影,得到太赫兹电场的偏振态。通常情况下测量太赫兹电场时使用扫描式抽运-探测的方法对时域波形进行重建,然而该方法并不适用于测量单发太赫兹辐射的偏振态。利用空气-等离子体偏压电场法测量太赫兹电场时,需要在等离子体上施加相互垂直的两组电压(一组正弦电压和一组余弦电压),用四分之一波片将探测光转换为圆偏振光,此时测得的光电流大小与太赫兹电场以及偏压电场有关。根据测得的光电流和加载的偏压电场,只需一次测量便可得到太赫兹电场的偏振态。但这种方法是基于空气-等离子体太赫兹辐射产生机制构建的,因而不适用于测量由固体靶产生的高能太赫兹辐射<sup>[5]</sup>。光电导天线法在传统光电导天线探测的基础上,增加了一个电极或两个电极,形成多触点天线,通过测量不同电极间光电流的变化来同时测量太赫兹电场在水平和竖直方向上的投影,得到太赫兹电场的偏振态。但是光电导天线损伤阈值较低,无法在较高光强下工作<sup>[14]</sup>,因而不能用于探测高能太赫兹辐射的偏振态。光弹调制器法通过周期性调制探测光偏振,进而根据晶体非线性系数、探测光和太赫兹电场偏振之间的关系<sup>[15]</sup>,得到太赫兹电场的偏振态。由于光弹调制器周期性调制探测光是一个连续的过程,因而不适合测量单发太赫兹辐射的偏振态。

本文提出一种单发测量太赫兹辐射偏振态的方案,并进行了验证性实验。通过分别测量太赫兹辐射水平方向和竖直方向的分量,得到太赫兹辐射的偏振态。实验测得的椭圆度( $e \approx 0.23$ )与模型分析吻合,验证了所提单发实验方案的可行性。

## 2 理论分析

将太赫兹波分束,利用两个独立校准的啁啾脉冲光谱编码单发测量装置,分别测量太赫兹辐射的两个正交偏振分量,通过重构进而得到太赫兹辐射的偏振态。啁啾脉冲光谱编码探测将太赫兹辐射的时间-振幅信息映射到探测脉冲光谱的频率-强度上,通过探测脉冲光谱强度分布的变化进一步获得太赫兹辐射的时域波形<sup>[16-17]</sup>。实验中一般利用光栅对进行频率啁啾,时间展宽。光栅对引入的是线性啁啾,因此探测脉冲的时间( $t_w$ )和频率( $\omega$ )之间有直接对应关系,即

$$t_w = \frac{\omega_0 - \omega}{2\alpha}, \quad (1)$$

式中: $\omega_0$ 为探测脉冲的中心频率; $\alpha$ 为啁啾率<sup>[18]</sup>。

啁啾探测脉冲中不同波长分量对应不同的时间延迟,因此当探测脉冲和太赫兹脉冲共线经过电光晶体时,不同波长成分会被不同时刻的太赫兹电场调制,而调制的大小和方向均正比于太赫兹电场的强度和极性。在有太赫兹电场作用时和没有太赫兹电场作用时,对比探测脉冲光谱强度分布的变化可以获得太赫兹电场的时域波形<sup>[16]</sup>。在实验中对时间轴的标定通过移动时间窗口的位置实现,时间窗口每移动 167 fs,对应光谱移动约 1 个像素,这种探测方法的时间分辨率( $T_{\min}$ )有限, $T_{\min}$ 可表示为

$$T_{\min} = \sqrt{\tau_0 \tau_{\text{ch}}}, \quad (2)$$

式中: $\tau_0$ 为展宽前探测脉冲的傅里叶变换极限脉宽; $\tau_{\text{ch}}$ 为啁啾脉冲的脉宽<sup>[18]</sup>。一方面为了提高时间分辨率,啁啾脉冲的脉宽要尽量小;另一方面,啁啾脉冲的脉宽要足够大以覆盖整个太赫兹电场的周期,因而实验时要在时间窗口与啁啾率之间取舍,通常选择时间窗口稍大于太赫兹电场的周期。

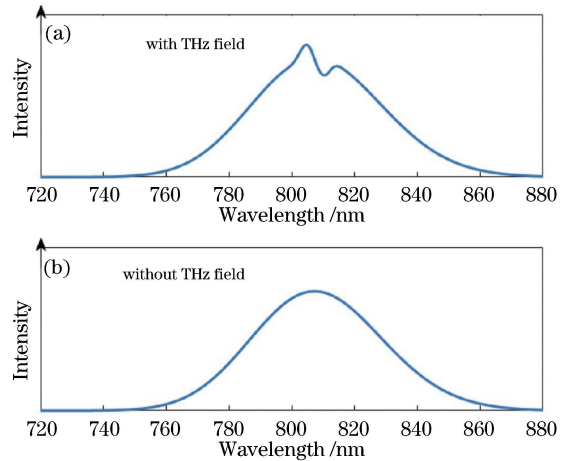


图 1 数值模拟结果。(a)有太赫兹电场时的探测脉冲的光谱;(b)没有太赫兹电场时探测脉冲的光谱

Fig. 1 Simulated results. (a) Spectrum of probe pulse with THz field; (b) spectrum of probe pulse without THz field

图 1(a)数值模拟结果为存在太赫兹电场调制时探测脉冲的光谱强度分布;图 1(b)数值模拟结果为没有太赫兹电场调制时探测脉冲的光谱强度分布,二者作差便可得到太赫兹辐射的时域光谱。数值模拟具体参数如下:探测脉冲脉宽为 5 ps,探测脉冲谱宽为 50 nm,太赫兹脉冲脉宽为 500 fs。

## 3 实 验

### 3.1 实验装置

啁啾脉冲光谱编码探测的实验装置如图 2 所

示,其中:QWP为四分之一波片;P1、P2为偏振片;P3、P4为太赫兹波偏振片;HWP为半波片;G1、G2为光栅;BS1、BS2、BS3为分束片;f1、f2、f3、f4为透镜;OAPM1、OAPM2为离轴抛物面镜;M1、M2、M3、M4、M5、M6、M7、M8、M9为反射镜;BBO为偏硼酸钡晶体( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)。实验中使用800 nm飞秒激光器(Elite-HP-USX, Coherent):脉宽约为40 fs,谱宽约为60 nm,重复频率为1 kHz。激光脉冲经过分束片(BS1)后分为抽运光和探测光,其中,抽运光能量为3 mJ;抽运光经过透镜(f1, 焦距为40 cm)和倍频晶体(BBO晶体, e轴与基频光的偏振方向的夹角为55°)后在空气中产生约1.5 cm长的等离子体丝,等离子体丝中会辐射出太赫兹辐射。太赫兹辐射经一对焦距为10 cm的离轴抛物面镜准直聚焦

到1 mm厚的<110>ZnTe晶体上,两离轴抛物面镜之间放置一对太赫兹波偏振片(P3和P4)。探测光经过光栅对(光栅刻线数为300槽/mm,光栅对之间的距离约为30 cm)后,脉宽被展宽到约7 ps,随后经过半波片和偏振片,最后经过透镜(f2, 焦距为30 cm)聚焦到ZnTe晶体上。半波片与格兰偏振棱镜配合使用可以调节探测光光强。当太赫兹脉冲和探测脉冲共线经过ZnTe晶体时,探测脉冲的不同波长分量被不同时刻的太赫兹电场调制,调制的大小和方向正比于太赫兹电场的强度和极性。经过QWP和偏振片P2后,由光纤光谱仪(HR4000, 波长范围为200~1100 nm, 光谱分辨率达0.02 nm, 杂散光在600 nm时小于0.05%, 在435 nm时小于0.10%)接收信号。QWP用来调节电光调制的工作点,减小失真。

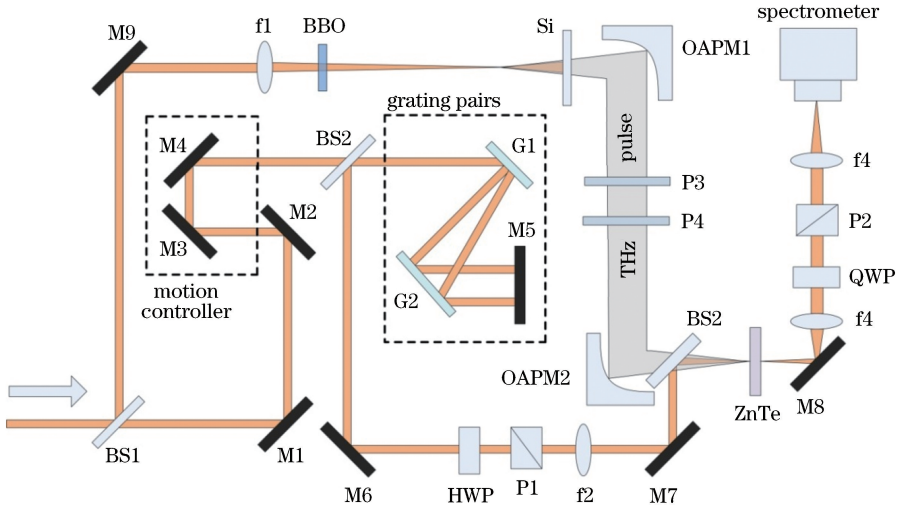


图2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

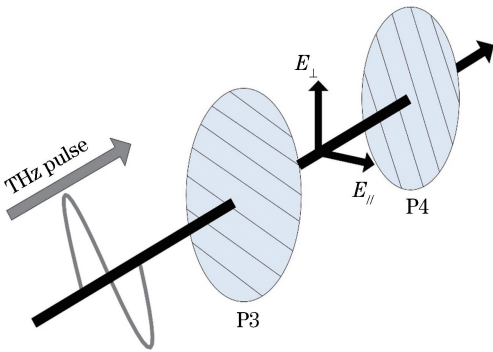


图3 太赫兹偏振片的摆放(P3和P4为太赫兹波偏振片)

Fig. 3 Arrangement of THz polarizers (P3 and P4 are THz polarizers)

为测量太赫兹辐射的偏振态,在图3所示光路中放置了一对太赫兹波偏振片P3和P4<sup>[8]</sup>。P3的透射方向与水平方向成0°或90°;P4的透射方向与

水平方向夹角为45°。P4接近电光晶体且偏振方向固定不变,这样可以控制检测时探测光偏振方向、太赫兹辐射偏振方向和电光晶体轴向之间角度不变,从而保证检测部分的响应函数不变。当第一个偏振片(P3)与水平方向夹角为90°时,测量值为 $E_1(t)$ ;当第一个偏振片(P3)与水平方向夹角为0°时,测量值为 $E_2(t)$ ,可得几何关系

$$\begin{cases} E_1(t) = E_{\perp}(t) \cos 45^{\circ} \\ E_2(t) = E_{\parallel}(t) \cos 45^{\circ} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{\perp}(t)$ 为太赫兹辐射在垂直方向的分量; $E_{\parallel}(t)$ 为太赫兹辐射在水平方向的分量; $t$ 为时间。通过旋转偏振片P3,得到太赫兹辐射水平方向和垂直方向的分量,进而得到太赫兹辐射的偏振态。

### 3.2 实验结果与分析

实验中利用图2所示实验装置测量椭圆偏振的

太赫兹辐射。图 4(a)中  $E_y^{\text{THz}} = 0$  平面上的波形为太赫兹电场在水平方向的分量,  $E_x^{\text{THz}} = 1$  平面上的波形为太赫兹电场在竖直方向上的分量, 二者可以合成太赫兹电场随时间演化的波形, 合成的太赫兹

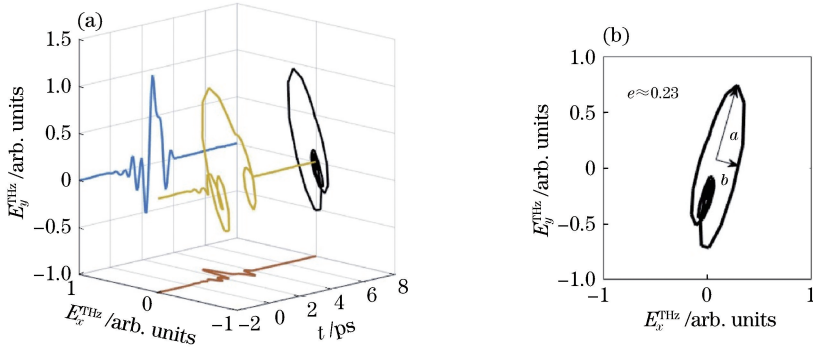


图 4 实验测量结果。(a)太赫兹电场随时间演化的波形;(b)太赫兹电场的偏振态

Fig. 4 Experimental results. (a) Time evolution of THz field; (b) polarization state of THz field

研究发现,通过双色激光场抽运一定长度的等离子体光丝可以得到具有一定椭圆度的太赫兹波<sup>[19]</sup>。对实验中产生太赫兹辐射的椭圆度进行估算,模拟选取的具体参数值如下:基频光光强为  $1.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ,倍频光光强为  $2.0 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ,基频光脉宽为 40 fs,倍频光脉宽为 28 fs,这些均接近于实验值。根据 ADK (Ammosov-Delone-Krainov) 模型计算得等离子体密度约为  $7.18 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在等离子体丝中,激光脉冲 ( $n_{\text{opt}}$ ) 和太赫兹脉冲 ( $n_{\text{THz}}$ ) 的折射率的计算公式为

$$\begin{cases} n_{\text{opt}} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \\ n_{\text{THz}} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{i\gamma\omega + \omega^2}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\omega_p$  为等离子体频率;  $\gamma$  为电子离子碰撞频率<sup>[20]</sup>。计算得到  $n_\omega = 0.99997939$ ,  $n_{2\omega} = 0.999999485$ ,  $n_{\text{THz}} = 0.99799021$ , 其中,  $n_\omega$  为基频光在空气中的折射率,  $n_{2\omega}$  为倍频光在空气中的折射率。对比可得,基频光与倍频光的折射率差值比基频光与太赫兹波折射率的差值小了约两个数量级,所以在考虑激光脉冲与太赫兹脉冲速度失配时,基频光与倍频光折射率差的影响可忽略<sup>[21]</sup>。选取基频光折射率作为激光脉冲的折射率进行计算,二者折射率差  $\Delta n = n_\omega - n_{\text{THz}} = 1.9 \times 10^{-3}$ 。计算表明,等离子体丝后端辐射出的太赫兹电场到达远场的时间比丝前端滞后了约 0.1 ps。当丝前端与后端辐射出的太赫兹辐射振幅比为 1:1 时,能够得到的太赫兹辐射最大的椭圆度约为 0.33,即实验中能够得到椭圆度不超过 0.33 的太赫兹辐射。实验测量得到

电场在  $t = 8 \text{ ps}$  ( $t$  为时间) 平面上的投影为其偏振态。图 4(b)中,  $a$  为椭圆偏振太赫兹辐射的长轴;  $b$  为短轴,椭圆度  $e = b/a$ ,测量得到的最大椭圆度约为 0.23。

的椭圆度 ( $e \approx 0.23$ ) 在模型分析的合理范围内,验证了实验方案的可行性。

根据瞬态光电流模型,通过改变双色场的相对相位可以实现对太赫兹辐射偏振方向的控制,原因在于双色场对自由电子轨迹可控<sup>[22-23]</sup>。实验中通过减小 BBO 晶体与等离子体丝之间的距离来改变双色场的相对相位,实现了对太赫兹辐射偏振方向的调控。实验结果如图 5 所示,  $d$  为 BBO 晶体与等离子体丝之间距离的变化量,每隔 2 mm 测量一次太赫兹辐射的偏振态。实验中随着 BBO 晶体与等离子体丝之间的距离减小了 12 mm (对应双色场相位增加了  $0.46\pi$ ),太赫兹辐射的偏振方向逆时针旋转了约  $80^\circ$ ,由此表明实验结果及理论计算结果一致<sup>[23]</sup>。另外,实验结果证明随着太赫兹辐射偏振方向的变化,太赫兹辐射的椭圆度也发生对应变化。该现象与课题组之前的理论计算相符<sup>[24]</sup>,原因在于基频光经过 BBO 晶体后在  $o$  轴和  $e$  轴方向引入了非对称延迟。

## 4 结 论

提出了一个单发测量太赫兹辐射偏振态的方案。在验证性实验中,使用一对太赫兹波偏振片,用一路探测光先后测量太赫兹辐射水平方向和竖直方向的分量,通过进一步重构得到了太赫兹辐射的偏振态。测量得到的太赫兹辐射椭圆度与模型分析相符,验证了实验方案的可行性。本方案为实现单发太赫兹辐射偏振态的测量研究提供了新思路,未来可用于研究一些不可逆的或者低重复频率的物理过程。



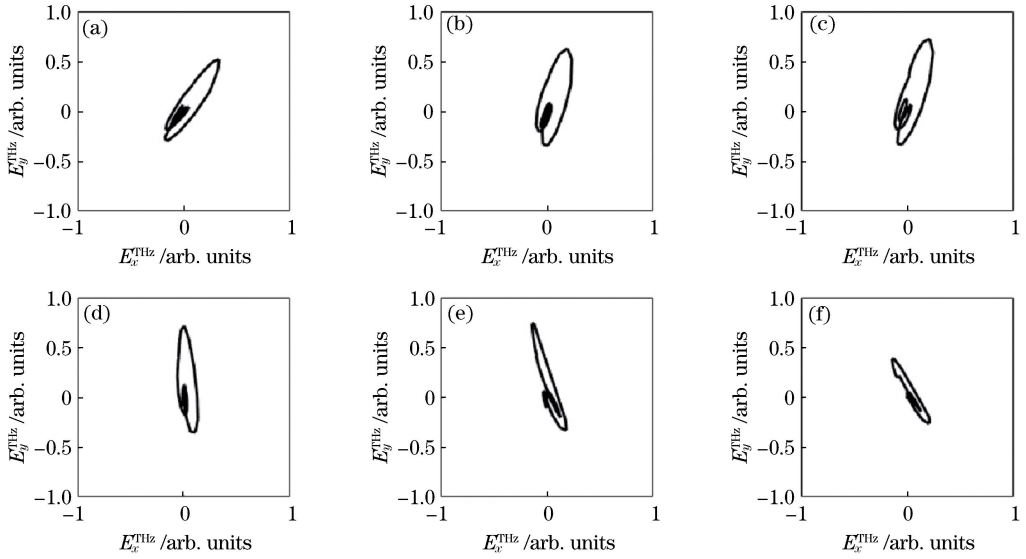


图 5 不同 BBO 晶体位置下的太赫兹辐射偏振态。

(a)  $d=0$  mm; (b)  $d=2$  mm; (c)  $d=4$  mm; (d)  $d=6$  mm; (e)  $d=8$  mm; (f)  $d=10$  mm

Fig. 5 Polarization states of THz radiation at different positions of BBO crystal. (a)  $d=0$  mm; (b)  $d=2$  mm; (c)  $d=4$  mm; (d)  $d=6$  mm; (e)  $d=8$  mm; (f)  $d=10$  mm

### 参 考 文 献

- [1] Hoshina H, Hayashi A, Miyoshi N, *et al.* Terahertz pulsed imaging of frozen biological tissues [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(12): 123901.
- [2] Schubert O, Hohenleutner M, Langer F, *et al.* Sub-cycle control of terahertz high-harmonic generation by dynamical Bloch oscillations [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 119-123.
- [3] Kampfrath T, Sell A, Klatt G, *et al.* Coherent terahertz control of antiferromagnetic spin waves [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(1): 31-34.
- [4] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, *et al.* High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5011-5014.
- [5] Liao G Q, Li Y T, Li C, *et al.* Bursts of terahertz radiation from large-scale plasmas irradiated by relativistic picosecond laser pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(25): 255001.
- [6] Li Y T, Li C, Zhou M L, *et al.* Strong terahertz radiation from relativistic laser interaction with solid density plasmas [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(25): 254101.
- [7] Liao G Q, Li Y T, Zhang Y H, *et al.* Demonstration of coherent terahertz transition radiation from relativistic laser-solid interactions [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(20): 205003.
- [8] Nagai M, Mukai N, Minowa Y, *et al.* Achromatic THz wave plate composed of stacked parallel metal plates [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 146-149.
- [9] Lü Z H, Zhang D W, Meng C, *et al.* Polarization-sensitive air-biased-coherent-detection for terahertz wave [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(8): 081119.
- [10] Castro-Camus E, Lloyd-Hughes J, Johnston M B, *et al.* Polarization-sensitive terahertz detection by multicontact photoconductive receivers [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(25): 254102.
- [11] Makabe H, Hirota Y, Tani M, *et al.* Polarization state measurement of terahertz electromagnetic radiation by three-contact photoconductive antenna [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11650-11657.
- [12] Bulgarevich D S, Watanabe M, Shiwa M, *et al.* A polarization-sensitive 4-contact detector for terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10332-10340.
- [13] Nemoto N, Higuchi T, Kanda N, *et al.* Highly precise and accurate terahertz polarization measurements based on electro-optic sampling with polarization modulation of probe pulses [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17915-17929.
- [14] Reimann K. A table-top source of strong pulses [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 596-597.
- [15] Nahata A, Weling A S, Heinz T F. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(16): 2321-2323.
- [16] Jiang Z P, Zhang X C. Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam [J].

- Applied Physics Letters, 1998, 72(16): 1945-1947.
- [17] Lin Q G, Pan X J, Zheng S Q, *et al.* Crossed and balanced single-shot electro-optic measurement for terahertz pulses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0114001.  
林庆钢, 潘新建, 郑水钦, 等. 太赫兹脉冲的正交平衡单次电光测量 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0114001.
- [18] Sun F G, Jiang Z P, Zhang X C. Analysis of terahertz pulse measurement with a chirped probe beam[J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(16): 2233-2235.
- [19] You Y S, Oh T I, Kim K Y. Mechanism of elliptically polarized terahertz generation in two-color laser filamentation[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1034-1036.
- [20] Kim K Y, Taylor A J, Glowacki J H, *et al.* Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions[J]. Nature Photonics, 2008, 2(10): 605-609.
- [21] Li N, Bai Y, Liu P. Ellipticity characteristic of terahertz radiation source generated from vacuum jet target [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0326002.  
李娜, 白亚, 刘鹏. 真空喷气靶太赫兹辐射源椭圆度特性[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0326002.
- [22] Dai J M, Karpowicz N, Zhang X C. Coherent polarization control of terahertz waves generated from two-color laser-induced gas plasma [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(2): 023001.
- [23] Wen H D, Lindenberg A M. Publisher's note: coherent terahertz polarization control through manipulation of electron trajectories [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(11): 119903.
- [24] Wang H G, Li N, Bai Y, *et al.* Generation of largely elliptically polarized terahertz radiation from laser-induced plasma[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 30987-30995.