

文章编号: 0258-7025(2009)08-2104-05

# 太赫兹脉冲能量测量

孙金海<sup>1,2,4</sup> S. Brussaard<sup>3</sup> J. G. Gallacher<sup>4</sup> N. Lemos<sup>5</sup>  
R. Issac<sup>4</sup> D. Jaroszynski<sup>4</sup> 黄志洵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国家电磁散射辐射重点实验室, 北京 100854

<sup>2</sup>中国传媒大学信息工程学院, 北京 100024

<sup>3</sup>Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, 5600 MB, Netherlands

<sup>4</sup>Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow, G4 0NG, UK

<sup>5</sup>GoLP/Centro de Física de Plasmas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1049-001, Portugal

**摘要** 利用太赫兹波的单啁啾脉冲电光探测技术,通过调节实验装置中 $\lambda/4$ 波片晶轴与探测激光线偏振方向成 $45^\circ$ ,可以巧妙地得到太赫兹波的绝对电场强度。利用 CCD 阵列,通过抽运探测的方法可以得到太赫兹脉冲的光斑尺寸,进而在两步实验的基础上计算得到太赫兹脉冲的能量。提供了一种行之有效的测量太赫兹脉冲能量的实验方案。

**关键词** 太赫兹;绝对电场强度;太赫兹光斑;脉冲能量;抽运探测

**中图分类号:** O433 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093608.2104

## Energy Measurement of Terahertz Pulse

Sun Jinhai<sup>1,2,4</sup> S. Brussaard<sup>3</sup> J. G. Gallacher<sup>4</sup> N. Lemos<sup>5</sup>  
R. Issac<sup>4</sup> D. Jaroszynski<sup>4</sup> Huang Zhixun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing, 100854, China

<sup>2</sup>School of Information Engineering, Communication University of China, Beijing, 100024, China

<sup>3</sup>Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, 5600 MB, Netherlands

<sup>4</sup>Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow, G4 0NG, UK;

<sup>5</sup>GoLP/Centro de Física de Plasmas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1049-001, Portugal

**Abstract** Using single-shot chirped pulse electric-optic detector technique, the absolute electric field intensity can be obtained by tuning the angle to  $45^\circ$ , which is between crystal axis of quarter wave-plate (QWP) and linear polarization direction of detection laser. With charge coupled device (CCD), the size of terahertz spot can be gotten by probe-pump measurement. The energy of terahertz pulse is calculated with the experimental results. An effective method of measuring the terahertz pulse energy is provided.

**Key words** terahertz; absolute electric field intensity; terahertz spot; pulse energy; pump-probe

## 1 引言

太赫兹光谱技术和成像技术<sup>[1~5]</sup>在过去的 20 年里得到了迅速的发展,在这些技术中只需要太赫兹信号的相对电场强度<sup>[6~9]</sup>,所以长期以来很少关注绝对电场强度的测量。但是随着太赫兹技术的发

展和应用,人们认识到太赫兹辐射能量<sup>[10,11]</sup>日益成为太赫兹技术在应用推广中的严重瓶颈。为了促进太赫兹辐射源的研究,本文研究了如何测量太赫兹脉冲的绝对电场强度及其光斑大小,并在此基础上计算得出了太赫兹脉冲的能量值。

**收稿日期:** 2008-09-01; **收到修改稿日期:** 2008-11-13

**基金项目:** 国家留学基金委中英卓越计划联合培养博士生项目资助课题。

**作者简介:** 孙金海(1974—),男,工程师,博士,主要从事太赫兹波技术方面的研究。E-mail:jinhaisun@gmail.com

## 2 实验装置

图 1 给出了实验时的抽运探测光路,所用激光的中心波长为 800 nm,脉冲宽度为 60 fs,重复频率为 10 Hz,激光束在分束镜 BS 处被分为两束,透过的一束经反射镜  $M_1 \sim M_3$  后照射到加有直流偏压的 GaAs 晶体上,抽运出的太赫兹波经抛物面镜 PM 反射后会聚到 ZnTe 探测晶体上;由 BS 反射的另一束激光作为探测光,经过中性滤光器  $ND_1$  及反射镜  $M_4$  后,首先进入由光栅对  $G_1, G_2$  以及正交平面镜  $M_{5,6}$  组成的啾啾展宽装置,然后经  $M_7, M_8$  反射后进入由  $M_9$  和  $M_{10}$  组成的时间延迟器内,再经凸透镜  $L_1$  的聚焦会聚到 ZnTe 晶体上与迎面而来的太赫兹脉冲共线相遇,调节  $M_9 \sim M_{10}$  延时器,可以得到太赫兹脉冲与探测激光脉冲到达 ZnTe 晶体时间上的同步。太赫兹脉冲电场调制 ZnTe 晶体内的折射率椭球,从而改变探测激光脉冲的偏振状态。载有太赫兹电场信息的探测激光脉冲继续向前传播,经过抛物面镜中心的小孔后被凸透镜  $L_2$  会聚,继而经过  $\lambda/2$  波片和  $\lambda/4$  波片,以及偏振立方 Analyser 后,经反射镜  $M_{11}$  反射透过另一中性滤光器  $ND_2$  进入光谱仪,从而进行太赫兹脉冲绝对电场强度测量时光谱的采集。

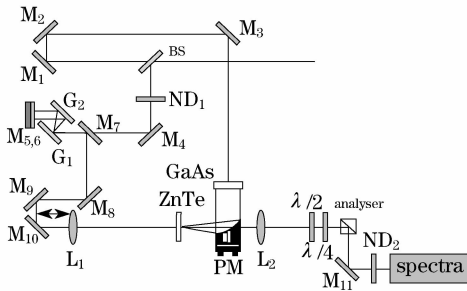


图 1 实验光路示意图

Fig. 1 Diagram of experiment setup

当测量太赫兹光斑大小时,光路中在  $L_1$  处更换为光阑  $I_1$ ,在光谱仪处更换为电荷耦合器件 CCD 阵列,同时由于  $L_1$  的缺失,还需前后调节  $L_2$  透镜或 CCD 位置,以在 CCD 阵列上获取激光束的焦点。GaAs 晶体前的抽运光束和  $L_1$  前的探测光束的光束直径均为 4.5 cm,探测光束在经光阑  $I_1$  后照射在 ZnTe 晶体表面上的光斑直径为 4 mm;照射在 GaAs 晶体上的抽运激光单脉冲能量为 6 mJ;照射在 ZnTe 晶体上的为探测激光脉冲,为保证其不将光路中的光栅 (ZnTe 前面的啾啾展宽光栅和后面光谱仪中的光栅) 和 CCD 烧坏,光路中用了多片中性滤光器来降低其光强。

## 3 绝对电场强度测量

实践表明,探测光最大的透射发生在  $\lambda/4$  波片晶轴和激光偏振方向间夹角为  $45^\circ$  处,为了精确地定出这一角度,测量了没有加载太赫兹波的情况下不同角度的  $\lambda/4$  波片对探测激光的透过率,见图 2 所示,其中曲线对应的拟合函数为  $I = I_{\max} \sin(x - x_0)$ 。

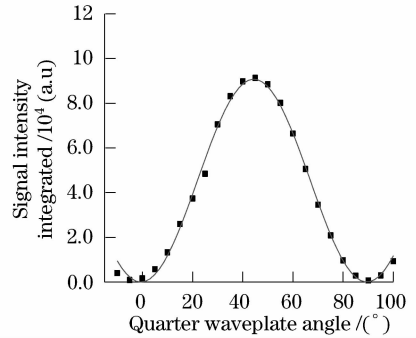


图 2 探测光透射强度与  $\lambda/4$  波片晶轴和激光偏振方向夹角的函数关系。图中曲线是对数据点的拟合

Fig. 2 Transmitted intensity of the probe beam as a function of quarter wave plate angle. The line is a fitting curve

没有加载太赫兹信号时,探测光的透射强度函数  $I_T$  可以被写作

$$I_T^{\text{THz}=0} = \frac{1}{2} I_0 \cdot T, \quad (1)$$

式中的  $I_0$  为入射探测光束光强,  $T$  为晶体和其他光学元件的传递系数(主要来自于晶体表面反射)。

相反,加载太赫兹信号后,探测光的透射强度可表示为

$$I_T^{\text{THz} \neq 0} = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \Gamma_{\text{THz}} \cos^2 2\delta + \sin \Gamma_{\text{THz}} \sin 2\delta \right) I_0 \cdot T, \quad (2)$$

其中  $\delta$  为  $\lambda/4$  波片晶轴与激光偏振方向的夹角,并且有

$$\Gamma_{\text{THz}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} L n^3 r_{41} E_{\text{THz}}, \quad (3)$$

这里  $\lambda_0$  为激光的中心波长,  $L$  为 ZnTe 晶体的厚度,  $n$  为 ZnTe 晶体的折射率,  $r_{41}$  为结构晶体的电光系数,  $E_{\text{THz}}$  为晶体中太赫兹波的电场强度。当  $\delta$  为  $45^\circ$  时,探测光束成为圆偏振光,分别测量了有和没有太赫兹波加载时透射的探测激光光谱,如图 3 所示。在这种情况下方程(2)降解为

$$I_T^{\text{THz} \neq 0} = \frac{1}{2} (1 + \sin \Gamma_{\text{THz}}) I_0 \cdot T. \quad (4)$$

结合方程(1)和(4)发现

$$\Gamma_{\text{THz}} = \arcsin\left(\frac{I_{\text{T}}^{\text{THz} \neq 0}}{I_{\text{T}}^{\text{THz} = 0}} - 1\right). \quad (5)$$

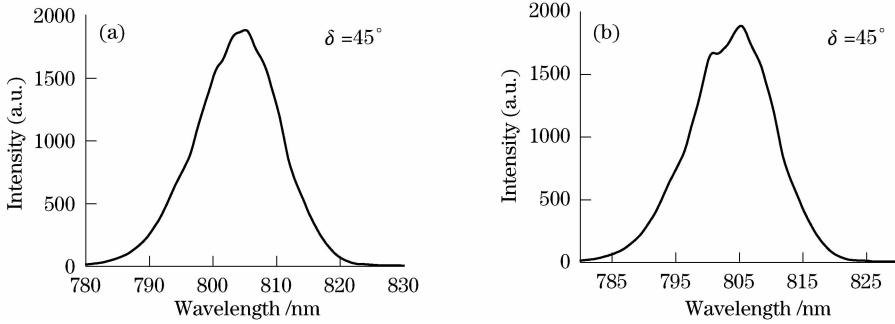


图 3 在没有(a)和有(b)太赫兹脉冲加载时的探测激光谱

Fig. 3 Spectra without (a) and with (b) the THz pulse

图 4 给出了  $\Gamma_{\text{THz}}$  曲线。

为了计算晶体外的太赫兹电场,必须对表面的

反射进行校正( $t_{\text{THz}} = \frac{n_{\text{THz}} - 1}{n_{\text{THz}} + 1} = 0.5, n_{\text{THz}} \approx 3$ )。太赫兹脉冲的电场强度可表示为

$$E_{\text{THz}} = \frac{\Gamma_{\text{THz}} \lambda_0}{2\pi L n^3 r_{41}} \cdot 2. \quad (6)$$

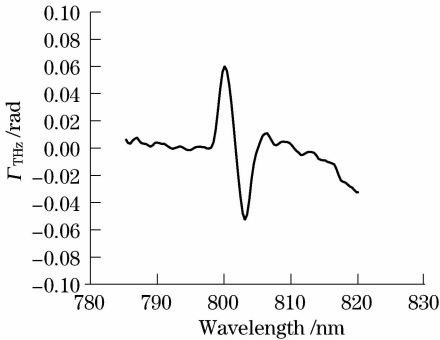


图 4 从图 3 的光谱中导出的  $\Gamma_{\text{THz}}$

Fig. 4  $\Gamma_{\text{THz}}$  derived from spectra in Fig. 3

经过校准可以知道探测脉冲上的啁啾约为 5 ps/20 nm。由此可以得到图 5 所示的太赫兹电场,其中的插图为对应的频域光谱曲线。

## 4 光斑测量

太赫兹光斑尺寸是通过抛物面镜将太赫兹波会聚到 ZnTe 晶体上,然后通过抽运探测的方式测量共线反向传播的探测光束而得到的。为得到最佳的信号背景之比, $\lambda/4$  波片被旋转了  $2^\circ \sim 3^\circ$  (接近线性偏振)。用一个凸透镜将晶体成像于相机的 CCD 阵列上。所成的像用一个直径为 200  $\mu\text{m}$  的细金属丝进行了校准,其给出的变换因子为 5.0  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。太赫兹波的光斑通过用有太赫兹信号时所成的像减去没有太赫兹信号时所成的像而得到。图 6 给出了

平均 10 个相片后的结果,其中图 6(a)为没有太赫兹脉冲时的背景光斑,图 6(b)为有太赫兹脉冲加载时的探测光光斑,图 6(c)为经处理后最终得到的太赫兹脉冲焦点光斑。

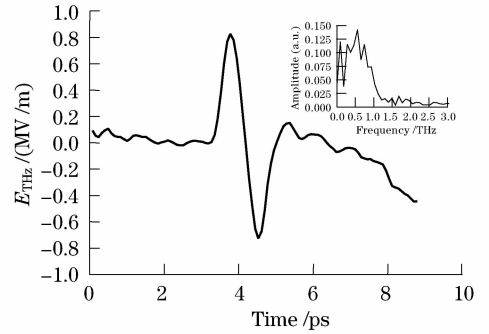


图 5 太赫兹电场与自变量时间的函数关系(时间零点具有任意性),其中的插图为对应的频域光谱曲线

Fig. 5  $E_{\text{THz}}$  as a function of time, in which  $t = 0$  is arbitrary. The embedded graph is frequency domain spectrum

对于这种实验装置,以及通过旋转晶体得到最大信号的近线性偏振情况下所得透射信号的透射强度可表示为

$$\frac{I_{\text{T}}}{I_0 T} = \frac{1}{2} (1 - \cos \Gamma_{\text{THz}}) = \sin^2 \frac{\Gamma_{\text{THz}}}{2} \approx \frac{\Gamma_{\text{THz}}^2}{4}. \quad (7)$$

因此所测透射强度事实上正比于太赫兹脉冲的强度。

通过将高斯线形拟合到水平和垂直线形上可以得到太赫兹波焦点光斑的尺寸,如图 7 所示。

通过拟合可以得到的光斑尺寸( $e^{-2}$  倍的半径)为: $x$  方向为  $1.22 \pm 0.04$  mm;  $y$  方向为  $1.19 \pm 0.08$  mm。这对应着  $1.4 \pm 0.06$  mm 的半峰全宽(FWHM)。太赫兹电场的强度分布可表示为

$$E_{\text{THz}}^2(r) = E_{\text{THz}}^2(0) \cdot e^{-4 \ln 2 \frac{r^2}{(\text{FWHM})^2}}. \quad (8)$$

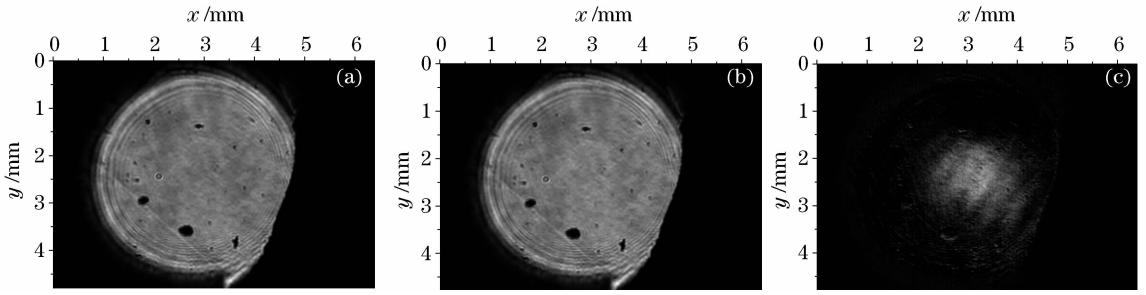


图 6 (a)没有太赫兹脉冲时的背景光斑;(b)有太赫兹脉冲加载时的光斑;(c)太赫兹脉冲焦点光斑

Fig. 6 (a) Background image without THz signal; (b) image with THz signal and background and (c) THz focal spot without background

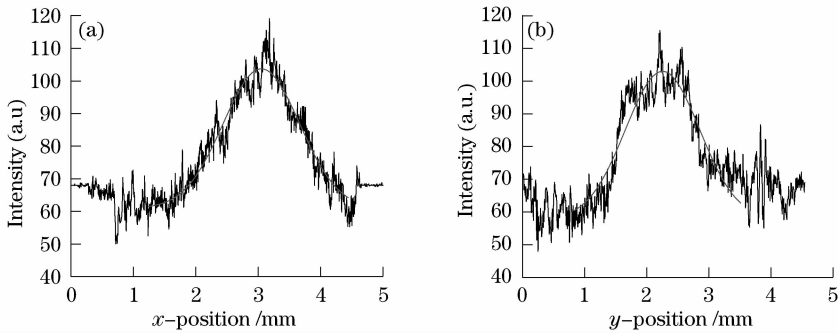


图 7 太赫兹焦点光斑的线形,平滑曲线为拟合到数据上的高斯线型

Fig. 7 Line-outs of the THz focal spot, the smooth lines are Gaussians fitted to the data

## 5 能量计算

通过在面积上和脉冲持续时间上的积分可以得到太赫兹脉冲的能量为

$$U_{\text{THz}} = \epsilon_0 c \iint_{A,t} E_{\text{THz}}^2 dA dt. \quad (9)$$

积分(9)式并且数值积分图 5 所示函数的平方后可以得到太赫兹脉冲的能量为

$$U_{\text{THz}} = \epsilon_0 c \cdot 2\pi \frac{(\text{FWHM})^2}{8 \ln 2} \times \int_t E_{\text{THz}}^2(0) dt = (2.6 \pm 0.2) \times 10^{-9} \text{J}. \quad (10)$$

结果中的误差主要来自于计算光斑尺寸时引入的半峰全宽值的误差。

## 6 结 论

结合理论分析,在实验装置中的  $\lambda/4$  波片晶轴与激光偏振方向成  $45^\circ$  夹角时,通过实验方便地测量出了太赫兹脉冲的绝对电场强度;借助于抽运探测和消光技术,用 CCD 阵列得到了太赫兹脉冲的光斑大小。综合两个实验的测量结果计算得出了本实验中用光导天线方法所获得的太赫兹脉冲的能量值。从而提供了一套有效的太赫兹脉冲能量测量实

验方案。

## 参 考 文 献

- Zhiping Jiang, X. C. Zhang. Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(14):1114~1116
- Charles A. Schmuttenmaer. Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy[J]. *Chem. Rev.*, 2004, **104**:1759~1779
- R. Appleby. Passive millimetre-wave imaging and how it differs from terahertz imaging[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2005, **362**:379~394
- S. Ariyoshi, C. Otani, A. Dobroiu *et al.*. Terahertz imaging with a direct detector based on superconducting tunnel junctions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**:203503
- Anthony J. Fitzgerald, Vincent P. Wallace, Jimenez-Linan Mercedes *et al.*. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors[J]. *Radiology*, 2006, **239**(2):533~540
- Shi Xiaoxi, Zhao Guozhong, Zhang Cunlin *et al.*. Terahertz radiation properties of low-temperature-grown GaAs photoconductive antenna[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 396~400
- 石小溪,赵国忠,张存林等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波的辐射特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):396~400
- Li Qi, Chi Xin, Shan Jixin *et al.*. Terahertz absorption characteristics of polytetrafluoroethylene[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):756~759
- 李琦,迟欣,单纪鑫等. 聚四氟乙烯材料的太赫兹特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):756~759
- Jia Yan, Chen Sijia, Li Ning *et al.*. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using back propagation neural

- networks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):719~722
- 贾 燕,陈思嘉,李 宁等. 利用误差逆传播神经网络法识别几种毒品的太赫兹光谱[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):719~722
- 9 Shi Wei, Zhang Xianbin, Jia Wanli *et al.*. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1735~1738
- 施 卫,张显斌,贾婉丽等. 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(12):1735~1738
- 10 Daniel Creeden, John C. McCarthy, Peter A. Ketteridge *et al.*. Compact, high average power, fiber-pumped terahertz source for active real-time imaging of concealed objects[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10):6478~6483
- 11 T. Baehr Jones, M. Hochberg, Richard Soref *et al.*. Design of a tunable, room temperature, continuous-wave terahertz source and detector using silicon waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(2):261~268