

太赫兹时域光谱系统中 ZnTe 的偏振探测特性

何 君 张 波 赵 旭 王 岩 沈 京 玲

(首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 对太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统中电光晶体碲化锌 (ZnTe) 的偏振探测特性进行了研究。探究了晶轴偏转角、太赫兹偏振方向和探测光偏振方向三者的关系对差分电流 ΔI 的影响。根据理论推导, 差分探测信号 ΔI 与太赫兹与晶轴的角度 α 和探测光与晶轴的角度 φ 相关。对 $\alpha = \varphi$ 、 $\alpha = \varphi + \frac{\pi}{2}$ 、 $\alpha = \varphi + \frac{\pi}{4}$ 三种情况进行实验与计算, 实验结果与理论计算结果吻合较好。

关键词 物理光学; 太赫兹时域光谱系统; ZnTe; 偏振探测; 电光取样

中图分类号 O441 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s111001

Polarization Detection Characteristics of ZnTe in Terahertz Time-Domain Spectroscopy System

He Jun Zhang Bo Zhao Xu Wang Yan Shen Jingling

(Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract Polarization detection characteristics of the electro-optic crystal ZnTe in the terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system are investigated. The differential current associates with three factors which are direction of crystal axis, THz polarization direction and probe beam polarization direction. According to theoretical analysis, the differential current is relevant to the angle (α) between the THz polarization and the crystal axis and the angle (φ) between the probe beam polarization and the crystal axis. Experiments and calculations are conducted in the cases of $\alpha = \varphi$, $\alpha = \varphi + \pi/2$, $\alpha = \varphi + \pi/4$, and the experimental results agree well with the calculation results.

Key words physical optics; terahertz time-domain spectroscopy system; ZnTe; polarization detection; electro-optic sampling

OCIS codes 040.2235; 300.6495; 110.6795

1 引 言

太赫兹 (THz) 波^[1-2] 通常是指频率为 0.1 ~ 10 THz (波长为 30 μm ~ 30 mm) 的电磁波, 在电磁波谱上位于微波和红外辐射之间, 属于远红外波段, 是电磁波谱新近开发的最后一个频率窗口。相对于其他波段, 太赫兹波在分析材料性质方面具有很大

优势, 其中太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 是一种非常有效的测量手段^[3]。THz-TDS 是 20 世纪 80 年代发展起来的一种相干探测技术, 它利用样品的 THz 透射或反射谱信息, 同时获得太赫兹脉冲的振幅信息和相位信息, 再通过时域波形进行傅里叶变换直接得到样品的吸收系数和折射率等光学参

收稿日期: 2013-07-27; 收到修改稿日期: 2013-10-09

基金项目: 北京市自然科学基金 (4102016)

作者简介: 何 君 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹光谱和太赫兹超材料等方面的研究。

E-mail: 929831543@qq.com

导师简介: 沈京玲 (1957—), 女, 博士, 教授, 主要从事太赫兹光谱、太赫兹成像和太赫兹波导等方面的研究。

E-mail: sjl-phy@cnu.edu.cn (通信联系人, 中国光学学会会员号: S040420387S)

数。在大多数 THz-TDS 中,探测技术通常采用电光取样的方法,利用太赫兹脉冲改变电光晶体的各向异性,致使探测脉冲的偏振发生改变,检验探测脉冲的偏振态变化就可以得到 THz 波的强度信息^[3]。在材料检测领域,偏振态的变化可以作为识别材料的一个重要信息^[4-6]。在太赫兹成像领域,王新柯^[7]提出了一种光学测量手段,可以将偏振测量技术有效地融入太赫兹实时成像中,大大扩充了所测量的太赫兹信息。由此可见偏振探测在 THz-TDS 中是十分重要的。为更好地应用 THz-TDS 中 ZnTe 晶体的偏振探测技术,本文对 TDS 中电光晶体 ZnTe 的晶轴偏转角度、太赫兹偏振方向和探测光偏振方向三者的关系如何影响差分电流强度进行了研究。

2 实验装置

图 1 为本实验系统的电光取样探测部分。图中的硅片对探测光束反射且对太赫兹光束起透射作用。无外加太赫兹波时,调节 1/4 波片使得差分信号 ΔI 为零,即图 1 中 $I_{D1}-I_{D2}$ 为零。外加太赫兹波后,太赫兹脉冲电场改变 ZnTe 晶体的折射率椭球,导致探测脉冲经过 ZnTe 晶体时,其偏振状态将会由线偏振转变为椭圆偏振,再经沃拉斯顿棱镜分成 s 偏振和 p 偏振,这两束光的光强差 ΔI ,即图 1 中 $I_{D1}-I_{D2}$,正比于太赫兹电场。调整探测脉冲和太赫兹脉冲之间的时间延迟,可得太赫兹脉冲电场的时域波形。

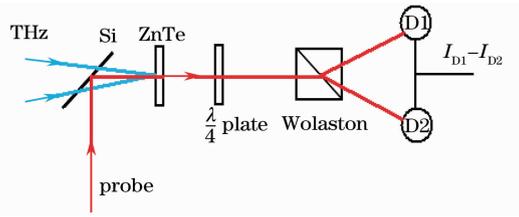


图 1 电光取样探测装置图

Fig. 1 Setup of electro-optic sampling detection

3 理论分析

利用探测光经过晶体时折射率椭球的变化来分析探测到的太赫兹信号的强度。实验选用的 ZnTe 晶体属于立方晶系,对称型是 43 点群,故其电光张量的唯一非零系数为 r_{41} 。

如图 2(a) 所示^[8],太赫兹波和探测光沿 (110) 向经过 ZnTe 晶体, α 和 φ 分别是太赫兹脉冲及探测脉冲的偏振方向与 ZnTe 的 (001) 轴的夹角, k_{THz} 和 k_p 为太赫兹脉冲及探测脉冲的传播方向, x 轴对应于 ZnTe 晶体的 (100) 轴, y 轴对应于 (010) 轴, z 轴对应于 (001) 轴。故其折射率椭球方程为^[8-10]

$$\frac{x^2}{n^2} + \frac{y^2}{n^2} + \frac{z^2}{n^2} + 2E_{\text{THz},1}r_{41}yz +$$

$$2E_{\text{THz},2}r_{41}xz + 2E_{\text{THz},3}r_{41}xy = 1, \quad (1)$$

式中 $E_{\text{THz},1}$ 、 $E_{\text{THz},2}$ 、 $E_{\text{THz},3}$ 分别是太赫兹电场在 x 、 y 、 z 方向的分量, n 是没有太赫兹电场时晶体的折射率。交叉项 yz , xz 和 xy 表明晶体折射率主轴和晶体的坐标轴并不重合,需要进行坐标变换,使折射率椭球的主轴和新坐标轴重合。

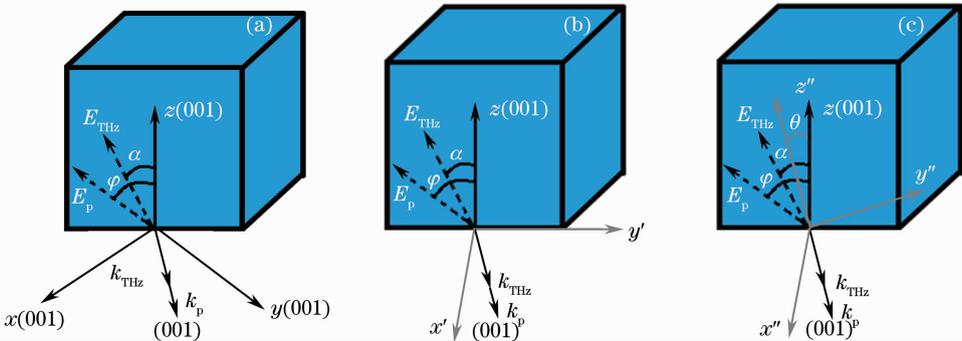


图 2 太赫兹光的偏振、探测光的偏振与 ZnTe 主轴的关系图。(a) 原始关系;

(b) 经过第一次坐标变换后的关系;(c) 经过第二次坐标变换后的关系

Fig. 2 Relationship among directions of THz polarization, probe beam and ZnTe crystal axis. (a) Original relationship;

(b) after the first coordinate transformation; (c) after the second coordinate transformation

坐标系绕 z 轴旋转 45° ,如图 2(b) 所示,(1)式的折射率椭球方程变为

$$x'^2 \left(\frac{1}{n^2} + E_{\text{THz},3}r_{41} \right) + y'^2 \left(\frac{1}{n^2} - E_{\text{THz},3}r_{41} \right) + \frac{z'^2}{n^2} + 2\sqrt{2}E_{\text{THz},1}r_{41}y'z' = 1. \quad (2)$$

因为在(2)式中仍有交叉项 $y'z'$ 存在,故进行第二次坐标变换,将坐标系沿 x' 轴旋转 θ 角,如图 2(c) 所示。

又由于太赫兹电场与 z 轴的夹角为 α , 故太赫兹电场在各轴的分量为

$$E_{\text{THz},3} = E_{\text{THz}} \cos \alpha, \quad (3)$$

$$E_{\text{THz},1} = 1/2 \sqrt{2} E_{\text{THz}} \sin \alpha. \quad (4)$$

经过第二次坐标变换后折射率椭球方程变为

$$x''^2 \left(\frac{1}{n^2} + E_{\text{THz}} r_{41} \cos \alpha \right) + y''^2 \left\{ \frac{1}{n^2} - E_{\text{THz}} r_{41} [\cos \alpha \sin^2 \theta + \cos(\alpha + 2\theta)] \right\} + z''^2 \left\{ \frac{1}{n^2} - E_{\text{THz}} r_{41} [\cos \alpha \cos^2 \theta - \cos(\alpha + 2\theta)] \right\} = 1, \quad (5)$$

式中 θ 是与 α 有关的变量, 即

$$2\theta = -\arctan(2 \tan \alpha) - n\pi, \left(n - \frac{1}{2} \right) \pi \leq \alpha < \left(n + \frac{1}{2} \right) \pi \quad n = 0, 1, \dots \quad (6)$$

当电场较弱时, 由折射率椭球方程[(5)式]可得主折射率为

$$n_{y'}(\alpha) \approx n + \frac{n^3}{2} E_{\text{THz}} r_{41} [\cos \alpha \sin^2 \theta + \cos(\alpha + 2\theta)], \quad (7)$$

$$n_{z'}(\alpha) \approx n + \frac{n^3}{2} E_{\text{THz}} r_{41} [\cos \alpha \cos^2 \theta - \cos(\alpha + 2\theta)]. \quad (8)$$

可见 $n_{y'}$, $n_{z'}$ 并不相同, 探测光由线偏振转换成椭圆偏振。通过简单的计算可以得到在两个方向上, 不同偏振分量的强度差(差分强度) ΔI 的表达式为

$$\Delta I(\alpha, \varphi) = I_p \sin[2(\varphi - \theta)] \sin \left\{ \frac{\omega}{c} [n_{y'}(\alpha) - n_{z'}(\alpha)] L \right\}, \quad (9)$$

式中 I_p 为探测光的强度, L 为 ZnTe 的厚度, ω 为探测光的角频率, c 为真空中的光速。由于(9)式中 $\frac{\omega}{c} [n_{y'}(\alpha) - n_{z'}(\alpha)] L \ll 1$, 所以 $\sin \left\{ \frac{\omega}{c} [n_{y'}(\alpha) - n_{z'}(\alpha)] L \right\} \approx \frac{\omega}{c} [n_{y'}(\alpha) - n_{z'}(\alpha)] L$ 。将(5)式、(6)式和(8)式代入(9)式, 简化并取绝对值可得

$$|\Delta I(\alpha, \varphi)| = |I_p \frac{\omega n^3 E_{\text{THz}} r_{41} L}{2c} (\cos \alpha \sin 2\varphi + 2 \sin \alpha \cos 2\varphi)|. \quad (10)$$

由(10)式可以看到, 太赫兹电场强度和测量得到的差分电流强度成正比。在测量太赫兹电场时, 为了获得最大的探测强度, 必须同时考虑探测光偏振方向与晶体的夹角和太赫兹电场的偏振方向与晶体的夹角两方面的因素。

4 实验与计算结果

利用 Mathematic 5.0 软件对上述计算进行作图。计算结果与实验结果均进行归一化处理。图 3(a) 表示当 $\alpha = \varphi$ 时, 差分电流强度 ΔI 随 $z(001)$ 轴在 $\left(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \right)$ 区间变化的实验结果和计算结果。当 z 轴(001)方向为 $-\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{\pi}{2}$ 时, 即太赫兹偏振方向平行于探测光偏振方向, 且与 ZnTe 晶轴方向垂直时, 所探测的差分电流信号 ΔI 最强。

图 3(b) 表示当 $\alpha = \varphi + \frac{\pi}{2}$ 时, 差分电流强度 ΔI

随 $z(001)$ 轴在 $\left(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \right)$ 区间变化的实验结果和计算结果。当 z 轴(001)方向为 $-\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{\pi}{2}$ 时, 即太赫兹偏振方向与 ZnTe 晶轴方向和探测光偏振方向均垂直时, 所探测的差分电流信号 ΔI 最强。

图 3(c) 表示当 $\alpha = \varphi + \frac{\pi}{4}$ 时, 差分电流强度 ΔI 随 $z(001)$ 轴在 $\left(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \right)$ 区间变化的实验结果和计算结果。当 $z(001)$ 轴方向为 $-\frac{\pi}{3}$ 和 $\frac{\pi}{3}$ 时, 即太赫兹偏振方向与探测光夹角 45° 、与晶轴方向夹角为 60° 时, 所探测的差分电流信号 ΔI 最强。由图 3(a) 和图 3(b) 以及图 3(c) 三图对比可知, 当探测光和太赫兹偏振方向成 45° 时, 极大值点对应之前两种情况的极小值点, 极小值点对应之前两种情况的极大值点。三种情况的实验结果与计算结果均吻合较好。

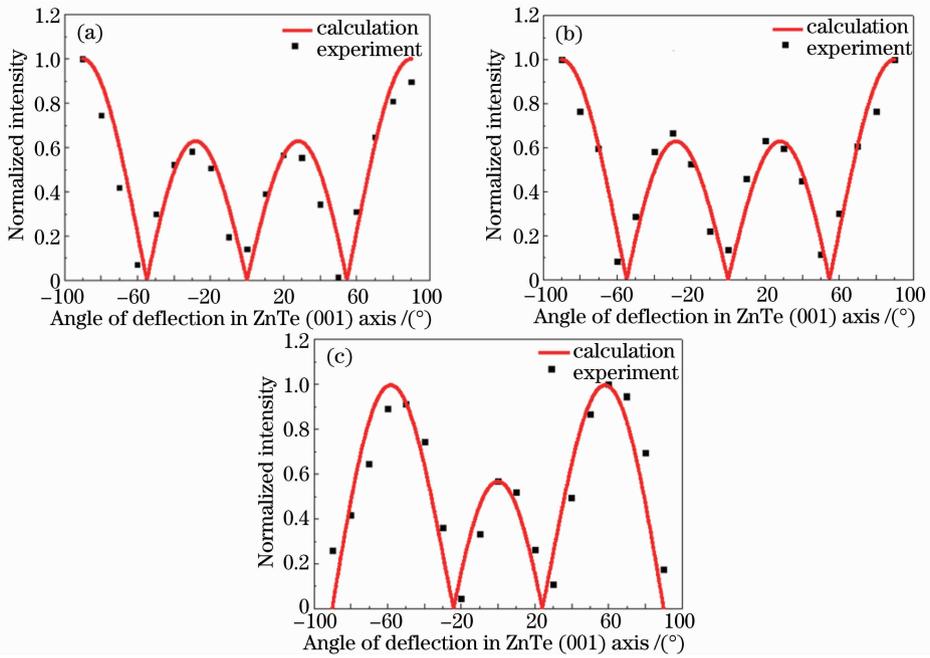


图 3 实验和计算结果。(a) $\alpha=\varphi$; (b) $\alpha=\varphi+\pi/2$; (c) $\alpha=\varphi+\pi/4$

Fig. 3 Results of experiment and calculation. (a) $\alpha=\varphi$; (b) $\alpha=\varphi+\pi/2$; (c) $\alpha=\varphi+\pi/4$

5 结 论

研究了 THz-TDS 系统中 ZnTe 的偏振探测特性。通过实验和理论分析,得出以下结论:

1) 太赫兹偏振方向平行于探测光偏振方向,且与 ZnTe 晶轴方向垂直时,所探测的差分电流信号 ΔI 最强;

2) 当太赫兹偏振方向与 ZnTe 晶轴方向和探测光偏振方向均垂直时,所探测的差分电流信号 ΔI 最强;

3) 当太赫兹偏振方向与探测光夹角 45° 、与晶轴方向夹角为 60° 时,所探测的差分电流信号 ΔI 最强。

讨论了 ZnTe 晶轴方向、太赫兹偏振方向、探测光偏振方向之间比较重要的三种不同关系下测量信号的表现。研究三者的取向如何影响太赫兹波的探测非常重要。ZnTe 晶轴方向放置不当会影响测量结果,甚至测量不到太赫兹信号;太赫兹偏振方向经常需要通过测量得到,该研究实质上提供了一种测量太赫兹偏振方向的方法;探测光偏振方向在测量系统中也会由于种种原因发生变化。

参 考 文 献

1 D Ddragoman, M Dragoman. Terahertz fields and applications [J]. Prog in Quantum Electron, 2004, 28(1): 1-66.
 2 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. 1-150.

张存林, 张 岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 1-150.
 3 Cai He, Guo Xuejiao, He Ting, *et al.*. Terahertz wave and its new application[J]. Chin J Opt & Appl Opt, 2010, 3(3): 209-222.
 蔡 禾, 郭雪娇, 和 挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 209-222.
 4 N C J Van der Valk, W A M Van der Marel, P C M Planken. Terahertz polarization imaging [J]. Opt Lett, 2005, 30 (20): 2802-2804.
 5 C Jordens, M Scheller, M Wichmann, *et al.*. Terahertz birefringence for orientation analysis [J]. Appl Opt, 2009, 48 (11): 2037-2044.
 6 Zhang Liangliang. Terahertz Research Multi Wavelength Phase Imaging [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. 39-44.
 张亮亮. 太赫兹多波长位相成像研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2008. 39-44.
 7 Wang Xinke. Study and Improvement of Key Techniques in THz Real-Time Imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. 33-76.
 王新柯. 太赫兹实时成像中关键技术的研究与改进 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 33-76.
 8 P C M Planken, H K Nienhuys, H J Bakker, *et al.*. Measurement and calculation of the orientation dependence of terahertz pulse detection in ZnTe [J]. J Opt Soc Am B, 2001, 18 (3): 313-317.
 9 Guo Xuejiao. Study on the Jade Polarization Properties in Terahertz Region [D]. Beijing: Capital Normal University, 2010. 11-15.
 郭雪娇. 玉石在太赫兹波段的偏振特性研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2010. 11-15.
 10 Chen Q, Tani M, Zhiping Zhang, *et al.*. Electro-optic transceivers for terahertz-wave applications [J]. J Opt Soc Am B, 2001, 18(6): 823-831.