

# 偏振方向对 ZnTe 电光 THz 辐射探测的影响

顾春明, 刘锐, 贺莉蓉, 沈文忠

(上海交通大学物理系凝聚态光谱与光电子物理实验室, 上海 200030)

**摘要:**在实验上研究了探测光的偏振方向对 ZnTe 晶体 THz 探测的影响. 在一周 360° 范围内, 测量出现两次零值, 角度间隔为 180°, 在两个零值之间的 90° 处出现不为零的小值, 45° 处不为最大值. 将 ZnTe 晶体在 THz 辐射电脉冲作用下产生的电光效应等效于瞬间任意波片, 用琼斯矩阵法模拟实验过程, 结果表明除在 90° 处出现零值外其余模拟结果与实验结果相符. 用 THz 光子与横光学声子相互作用模型对此进行了定性解释.

**关键词:**红外物理; 光学非线性; THz 辐射; 电光效应; ZnTe 晶体

**中图分类号:** O47 **文献标识码:** A

## EFFECTS OF PROBE-BEAM POLARIZATION DIRECTION ON THz DETECTION IN ZnTe

GU Chun-Ming, LIU Rui, HE Li-Rong, SHEN Wen-Zhong

(Laboratory of Condensed Matter Spectroscopy and Opto-Electronic Physics,  
Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The effects of probe-beam polarization direction on the THz detection in ZnTe were investigated experimentally. By keeping the THz radiation intensity unchanged, we observed two minimums with an interval of 180° when the direction of the probe-beam polarization  $\theta$  was changed from 0 to 360°. Non-zero THz radiation was detected in the middle of the two minimums ( $\theta = 90^\circ$ ). The Jones Matrix method was employed to simulate the experiments by assuming the electro-optic effect in ZnTe under a THz field as an equivalent arbitrary wave plate. It was found that all the simulation results were in agreement with the experiments, except for  $\theta = 90^\circ$ . A qualitative explanation based on the interaction between THz photons and TO phonons was presented.

**Key words:** infrared physics; optical nonlinear; THz radiation; electro-optic effect; ZnTe crystal

### 引言

THz 辐射波在医学成像诊断<sup>[1]</sup>、材料科学<sup>[2]</sup>、电子器件检测<sup>[3]</sup>等领域具有广泛的应用前景而倍受人们的关注. 利用飞秒(fs)激光脉冲在电光晶体中的光学整流效应(即所谓反电光效应)产生 THz ( $10^{12}$  Hz) 辐射及利用电光晶体的电光效应探测 THz 辐射是目前用来产生和探测 THz 辐射的主要方法之一. 电光探测具有带宽大( $70\text{THz}^{[4]}$ )的特点, 已成为 THz 探测的普遍方法.

THz 辐射电脉冲作用在电光材料上将产生电光效应致使电光晶体转, 形成了瞬间的任意波片. 线偏振的探测光以合适的偏振方向入射由此而形成的

波片时, 电光相位延迟将使偏振方向或偏振状态发生改变, 其改变量与入射的 THz 辐射电场强度成正比(线性电光效应). 在电光材料后面用四分之一波片和偏振棱镜(WP)分别取出两个相互垂直的探测光分量, 用差分探测器(D2 - D1)测得这两个分量之差  $\Delta I = I_2 - I_1$ . 此信号与偏振特性改变量直接相关, 间接测量了 THz 辐射. THz 辐射的实验装置见参考文献<sup>[5]</sup>, 与本实验有关的实验装置见图 1(a). 在电光探测方面, 人们已经研究了(110)取向的 ZnTe 电光探测晶体的(001)方向与 THz 电场方向之间的关系<sup>[6,7]</sup>.

本论文着重研究探测光偏振方向对 THz 辐射测量的影响. 首先在实验上研究了探测光偏振方向

收稿日期: 2003 - 09 - 22, 修回日期: 2004 - 06 - 23

Received date: 2003 - 09 - 22, revised date: 2004 - 06 - 23

基金项目: 国家杰出青年基金(NSFC10125416)和上海市基础研究重点课题(03JC14082)

作者简介: 顾春明(1956-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学与光电子物理研究工作.

与 THz 辐射的关系, 在  $360^\circ$  范围内出现两个极小点. 然后用晶体光学的琼斯矩阵法对实验过程进行建模与模拟, 结果表明除线性电光效应外, 还存在其它高阶非线性效应的影响.

## 1 实验装置与结果

在 THz 辐射的实验装置中<sup>[5]</sup>, 我们以可调谐飞秒钛宝石激光器作为激发光源, 激光脉宽约 100fs, 重复频率 82MHz, 波长 800nm, 正入射晶体前功率 200mW, 光束分束比为 9:1, 泵浦光被机械斩波, 探测光经电动平移平台进行光学延迟, 并通过旋转一个半波片改变其偏振方向. 电光探测晶体为 (110) 取向的 ZnTe 晶体 (俄罗斯 RMT 公司生产), 晶体厚度 1.5mm, 大小  $10 \times 10$ mm.

图 1(b) 为实验室坐标系中探测光、THz 辐射偏振方向及晶体 (001) 轴之间的角度关系. 其中  $\alpha$  为 ZnTe 晶体 (001) 轴与 y 轴的夹角, Thz 辐射电场方向与 y 轴平行, 实验中这两个方向保持不变; THz 辐射和探测光沿 x 正方向传播;  $\theta$  为探测光偏振方向与 y 轴的夹角, 通过旋转探测光路上放置的半波片 (图中没有画出) 改变其值. 光电探测器为 New Focus 1607-AC 差分探测器 (Balanced Photoreceiver), 输出信号经锁相放大器, A/D 卡数据采集进入计算机, 计算机同时控制光学延迟移动平台. 图 2(a) 中实线为实验测得的 THz 辐射波形图. 坐标横轴为延迟时间, 纵轴为 THz 辐射电场强度. 图 2(b) 为 THz 辐射波经快速傅立叶变换 (FFT) 的频谱图, 频谱半宽约 2.5THz. 为了研究探测光偏振方向的影响, 在保持激光功率, 波长, 入射角度及晶体位置不变的情

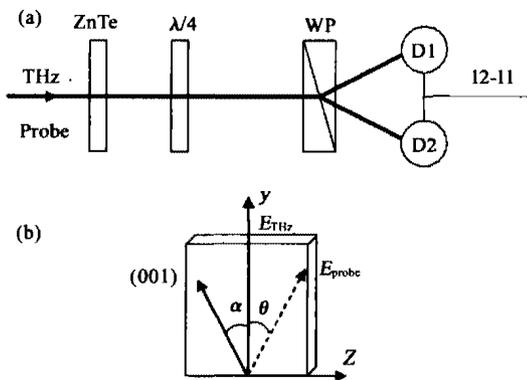


图 1 (a) 探测 THz 辐射电脉冲的实验装置, (b) 为实验室坐标系中探测光、THz 辐射偏振方向及晶体 (001) 轴之间的角度关系

Fig. 1 (a) Experimental setup for detecting the THz pulse electric field; (b) relations among the ZnTe crystal's (001) axis, the probe-beam polarization directions and the THz polarization direction (y axis).

况下, 在  $0-360^\circ$  范围内由小到大依次改变探测光偏振方向, 每次间隔  $10^\circ$ , 测量 THz 辐射波形, 并取各峰值  $E_{peak}$  以比较对应不同探测光偏振方向所测量得到的 THz 辐射电场强度的相对变化. 注意每次改变探测光偏振方向后都须相应地调整四分之一波片的快 (慢) 轴方向直至探测器输出值  $\Delta I_0 = I_2 - I_1$  达到最小后再开始延迟扫描测量.  $\Delta I_0$  不为零的原因可能是由于电光响应时间 ( $10^{-11}$  s) 远大于泵浦激光脉冲宽度 ( $10^{-13}$  s). 实验结果见图 3.

## 2 分析与模拟

我们使用的是方形 (110) ZnTe 晶体, 在晶体的其它晶轴方向未知的情况下, 将晶体的一个直角边与 y 坐标轴平行, 并假设晶体的 (001) 轴与 y 轴成  $\alpha$  角. 因为我们主要是研究探测光的偏振方向对测量的影响, 因而  $\alpha$  角的大小并不影响测量结果. 测量是以探测光偏振方向与 y 轴平行为起始零度角. 实验表明探测光偏振方向对同一个 THz 信号 (整个实验过程中 THz 辐射强度保持不变) 的测量存在影响. 如图 3 实线所示 (方形块为实验点), 当  $\theta$  角等于零 (即 THz 电场方向与探测光的偏振方向平行) 时, 输出不为零, 这说明在 THz 电场作用下, 晶体的感应介电主轴的方向与 y 轴不同向. THz 辐射电脉冲在 ZnTe 晶体内产生的电光效应完全可以等效于在脉冲持续时间内形成了一个瞬间的快 (慢) 轴方向即不是  $45^\circ$  也不平行于 y 轴 (或 z 轴) 的任意波片. 当  $\theta$  角约等于  $50^\circ$  时出现第一个极小值, 相隔  $180^\circ$  后再次出现极小值, 这表明这是一个特殊的方向, 根据参考文献<sup>[7]</sup>, 这两个角度所对应的方向应为晶体的 (001) 轴的方向. 在  $360^\circ$  范围内共出现两次极小值 (接近于零), 相隔角度  $180^\circ$ . 这是两个在实际测量中需要避免的角度. 实验还表明存在最佳的偏振方向, 可以获得最好的信噪比. 值得注意的是在这两极小值中间的相隔  $90^\circ$  处, 还存在一个不为零的小值. 问题是如果将 ZnTe 晶体的作用等效于任意波片, 则根据晶体光学, 当入射线偏振光的偏振方向与波片的快 (慢) 轴平行时, 出射光的偏振面不会改变仍然是线偏振光. 此时图 1(a) 测量系统的输出为零, 即无法获得正确的 THz 信号. 并且在  $360^\circ$  范围内应该存在正负快慢轴四个零值点而不是如实验图 3 实线所示的那样只有两个零值点. 下面将用晶体光学的琼斯矩阵法进一步模拟实验过程并进行分析.

在如图 1(b) 所示的实验室坐标系中, 如果将

ZnTe 晶体等效为一瞬间的任意波片, 图 1(a) 即为电光光强调制器. 设  $E_i$ 、 $G_s$  和  $G_{1/4}$  分别为入射线偏振光、晶体及四分之一波片的琼斯矩阵, 则出射光的琼斯矢量为:

$$E_t = G_{1/4} G_s E_i \quad (1)$$

其中:

$$E_t = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$$

$$G_s = \frac{1}{1 - itg \frac{\delta_s}{2}} \begin{bmatrix} 1 - itg \frac{\delta_s}{2} \cos 2\alpha & - itg \frac{\delta_s}{2} \sin 2\alpha \\ - itg \frac{\delta_s}{2} \sin 2\alpha & 1 + itg \frac{\delta_s}{2} \cos 2\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G_{1/4} = \frac{1}{1 - itg \frac{\delta_{1/4}}{2}} \begin{bmatrix} 1 - itg \frac{\delta_{1/4}}{2} \cos 2\beta & - itg \frac{\delta_{1/4}}{2} \sin 2\beta \\ - itg \frac{\delta_{1/4}}{2} \sin 2\beta & 1 + itg \frac{\delta_{1/4}}{2} \cos 2\beta \end{bmatrix}$$

将出射琼斯矩阵矢量的分量求模平方后相减正比探测器的输出  $\Delta I = I2 - I1$

$$\Delta I = I2 - I1 = |E_{tx}|^2 - |E_{ty}|^2 \quad (3)$$

式中  $\theta$  为探测光偏振面与实验室坐标  $y$  轴的夹角, 是模拟中的变量;  $\alpha$  为 ZnTe 晶体瞬间波片的快(慢)轴与  $y$  轴的夹角, 取任意值;  $\beta$  为四分之一波片的快(慢)轴与  $y$  轴的夹角, 取初始  $\Delta I_0$  等于零时的第一个  $\beta$  值;  $\delta_{1/4}$  为四分之一波片的相位延迟, 有  $\delta_{1/4} = \pi/2$ ;  $\delta_s$  为 ZnTe 晶体形成的瞬间波片的相位延迟, 取<sup>[8]</sup>:

$$\delta_s = B \int_T^{T+(d\Delta n/c)} E_{THz}(t) \exp\left[-\frac{\alpha c}{\Delta n}(t - T)\right] dt \quad (4)$$

式(4)中假设入射 THz 脉冲为高斯波形;  $d$  为晶体厚度;  $\Delta n$  为在晶体中 THz 辐射的折射率和探测光(800nm)的折射率之差,  $\Delta n = 3.17 - 2.85$ ;  $c$  为真空中光速;  $\alpha$  为晶体的 THz 吸收系数;  $B$  是与晶体电光系数  $\gamma_{41}$  等有关的量, 注意到实验中  $\Delta I$  与 THz 辐射强度呈线性关系<sup>[5]</sup>, 这说明调制系统工作在线性区( $\Delta I$  与 THz 辐射强度成正比), 故取适当的  $B$  值使  $\delta_s \sim \pi/2$ . 模拟中还假设入射探测光强度为 1. 基于上述考虑后模拟得到的 THz 辐射脉冲波形如图 2(a) 虚线所示, 可见数值模拟结果和实验结果相符合.

实验中每次改变  $\theta$  角度之后, 初始  $\Delta I_0$  也会有所变化, 而旋转四分之一波片时每隔  $90^\circ$  会出现一个最小. 在实验中是取相对最小和最稳定的一个  $\beta$

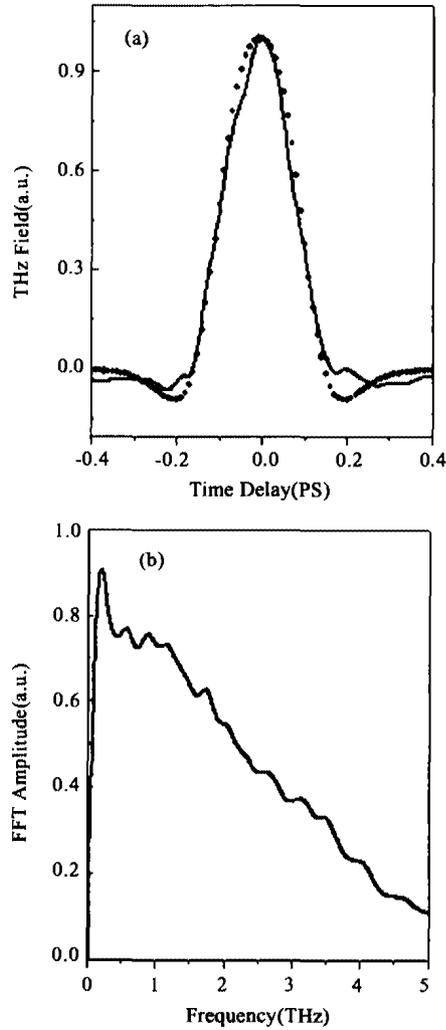


图 2 (a) 实线为 THz 辐射电场测量结果, 虚线为模拟计算结果; (b) 快速傅立叶变换得到的频谱  
Fig. 2 (a) Measured (solid curve) and calculated (dash curve) THz electric field; (b) frequency distribution by fast Fourier Transform (FFT).

角位置进行测量. 为真实模拟实验过程, 在模拟中选取第一个使  $\Delta I_0$  为零的  $\beta$  角带入式(2)和式(1)进行模拟. 每次得到的与图 2 虚线相似的波形后取其峰值, 即  $E_{peak}$ . 与实验过程相似, 模拟得到一系列  $E_{peak}(\theta)$  值. 模拟结果见图 3 虚线. 模拟中发现尽管不同的  $\alpha$  角的  $E_{peak}(\theta)$  曲线不尽相同, 但周期都为  $180^\circ$ , 半周期  $90^\circ$  处都会出现零值这一点是相同的. 因此图 3 中只给出了一条模拟曲线与实验曲线进行比较分析. 模拟中由于  $\beta$  取值存在的误差对各点的模拟结果影响较大, 再考虑实验误差, 所以很难实现模拟点和实验点的完全重合, 但曲线的整体趋势是能够说明问题的.

如图 3 虚线所示, 在  $50^\circ$  及  $230^\circ$  处(相隔  $180^\circ$ ) 出现零值, 这与实验情况相一致. 在  $95^\circ$  (转过  $45^\circ$ )

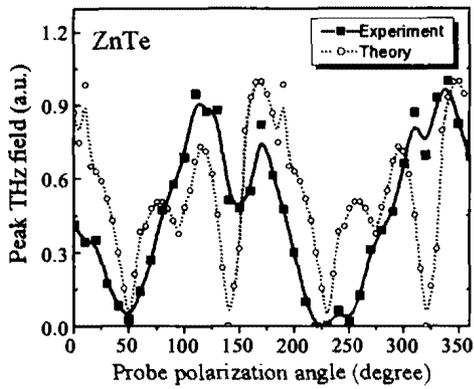


图3 THz辐射电场的峰值随探测光偏振方向的变化: 实心方形为实验值,空心圆形为模拟计算值。

Fig.3 Dependence of the peak THz electric field on the probe beam polarization angle. Measured: solid squares and calculated: open circles. The curves are a guide for eyes.

左右一定范围内均有较好的信噪比,但是模拟结果和实验结果均无法证明这个角为最佳偏振角(电光光强调制器一般取 $45^\circ$ 角); $140^\circ$ 及 $320^\circ$ (转过 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ )处,输出再次为零,这一点与晶体光学的结论相符合,但与实验结果存在较大差异.实验结果是系统输出在此处有所减弱但不为零.如果仍然用电光效应模型是无法解释这一现象的,是否存在更高阶的非线性效应的影响还有待探讨,在此我们作如下定性解释.

在THz波段,ZnTe中的声子对THz辐射波的影响较大<sup>[9]</sup>.从量子理论的观点出发,我们认为THz光子分别与晶体中的横光学(TO)声子和纵光学(LO)声子发生相互作用并产生散射.这两种相互正交的声子与THz光子相互作用,由于THz电磁波是横波,LO声子与THz光子之间的相互作用很弱,作用结果是不改变探测光的偏振特性,这个方向便是实验中对应于零输出的方向;而在与之垂直的横方向,TO声子较强的作用改变了该方向探测光的偏振特性,使得在这个方向上仍然有THz辐射输出.这种相互作用具有一定的空间分布,纵向最弱横向最强.这是一种更高阶非线性效应,要比二阶非线性电光效应对晶体的影响要弱的多,因而在横方向上输出不为零而是相对小值.当然这种解释还有待进一步深入的理论研究和实验证实.

### 3 结语

我们在实验上研究了探测光的偏振方向对ZnTe晶体THz辐射的电光探测的影响.实验中保持THz辐射强度不变,通过旋转半波片改变探测光的

偏振方向,实验结果表明在旋转一周 $360^\circ$ 范围内,测量出现两次零值,角度间隔为 $180^\circ$ ,在两个零值之间的 $90^\circ$ 处出现不为零的小值, $45^\circ$ 处不为最大值.实验表明探测光的偏振方向对THz辐射电光探测的影响较大.

在理论上我们将ZnTe晶体在THz辐射电脉冲作用下产生的电光效应等效于瞬间任意波片,引入一个与时间有关的电光相位延迟因子 $\delta$ ,用琼斯矩阵法模拟电光THz辐射探测的实验过程,模拟结果与晶体光学结论一致,与实验结果相比较,除在 $90^\circ$ 处出现零值外其余模拟结果与实验结果相符.用THz光子与TO声子相互作用模型对此进行了定性解释.

本课题得到了国家杰出青年基金的资助(NSFC10125416),感谢日本佐贺大学的郭其新教授提供了高质量的ZnTe晶体.

### REFERENCES

- [1] Han P Y, Cho G C, Zhang X C. Time-domain trans-illumination of biological tissues with terahertz pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 242—244.
- [2] Sinyukov A M, Hayden L M. Generation and detection of terahertz radiation with multi-layered electro-optic polymer films [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(1): 55—57.
- [3] Nuss M C, Orenstein J. Terahertz time-domain spectroscopy [C]. *Millimeter and Sub-millimeter Wave Spectroscopy in Solids*. 1998, **74**: 7—50.
- [4] Leitenstorfer A, Hunsche S, Shah J, et al. Detector and sources for ultrabroadband electro-optic sampling: Experiment and theory [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(11): 1516—1518.
- [5] Liu Rui, Gu Chun-Ming, He Li-Rong, et al. Generation of terahertz radiation via optical rectification and electro-optic detection in ZnTe crystal [J]. *Acta Physica Sinica* (刘锐, 顾春明, 贺莉蓉, 等. ZnTe晶体中光学整流产生的THz辐射及其电光探测研究, *物理学报*), 2004, **53**(4): 250—253.
- [6] Chen Q, Zhang X C. Polarization modulation in optoelectronic generation and detection of terahertz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(23): 3435—3437.
- [7] Planken P C M, Nienhys H K, Bakker H J, 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.
- [8] Uhd Jepsen P, Winnewisser C, Schall M, et al. Detection of THz pulses by phase retardation in lithium tantalate [J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **53**(4): R3052—R3052.
- [9] Shen Xue-Chu. *Spectroscopy and optical properties in semiconductors* [M], Beijing: Scientific Press 2nd Edition (沈学础. *半导体光谱和光学性质*. 北京: 科学出版社, 第二版), 2002.