ZnTe 晶体对太赫兹波的电光响应及极化匹配

孙金海,蔡 禾,张旭涛,张 景,刘永强,巢增明

(电磁散射重点实验室,北京 100854)

摘 要:给出了 ZnTe 电光晶体折射率和吸收系数随太赫兹波频率而变化的计算曲线,比较了太赫兹波在 ZnTe 中传播时的相速度和群速度。通过与太赫兹频率和晶体厚度相关的电光效率响应函数,理论计算了 ZnTe 电光晶体对太赫兹脉冲的探测电光响应,得到了晶体厚度与探测到的太赫兹频谱宽度的定性关系,从计算结果中找到了 ZnTe 电光晶体在 5.3 THz 和 6.2 THz 等多个频点的探测盲点,这些探测盲点来自于 ZnTe 电光晶体与相应频点太赫兹波的栅格共振吸收。结合自制的大口径太赫兹光导天线和 1 kHz 脉冲重复频率的太赫兹时域光谱实验系统,通过差分探测技术,从实验上得到了太赫兹波极化方向与〈110〉型 ZnTe 晶体晶轴方向的六个最佳匹配角度,给出了太赫兹电场最大值随晶轴与太赫兹波极化方向之间夹角变化的曲线及经验公式,这将有利于在实践中对该现象的深入理解和对探测灵敏度的有效提高。

关键词:太赫兹探测; ZnTe 晶体; 电光响应

中图分类号:TN29 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.1219001

Electric-optic response and polarization matching to terahertz pulse within ZnTe crystal

Sun Jinhai, Cai He, Zhang Xutao, Zhang Jing, Liu Yongqiang, Chao Zengming

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: The calculation curves of the refractive index and absorption coefficient of ZnTe electro-optic crystal with the frequency of terahertz wave were given, and the phase velocity and group velocity of terahertz wave propagating in ZnTe were compared. Through the electro-optic efficiency response function related to terahertz frequency and crystal thickness, the detection spectrum response of ZnTe electro-optic crystal to terahertz pulse was calculated theoretically and the relation between terahertz spectrum response bandwidth and crystal thickness was gotten qualitatively. From the calculation result, some detection blind spots were found such as 5.3 THz and 6.2 THz which come from the lattice resonances of ZnTe crystal with corresponding frequency terahertz wave. With a large aperture terahertz photoconductive antenna and a 1 kHz pulse repetition frequency terahertz time-domain spectroscopy experiment system, six optimum matching angles between the polarization direction of terahertz pulse and the crystal axis direction of <110> type ZnTe crystal were obtained experimentally by differential detection technology. The curve and empirical formula of the change of the maximum terahertz electric field with the angle between the crystal axis and terahertz wave polarization direction were given, which

收稿日期:2019-10-11; **修订日期**:2019-11-21

作者简介:孙金海(1974-),男,高级工程师,博士,主要从事太赫兹技术方面的研究。Email: jinhaisun@126.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

will be beneficial to in-depth understanding of the phenomenon and the effective improvement of detection sensitivity in practice.

Key words: terahertz detection; ZnTe crystal; electric-optic response

0 引 言

随着超快激光的发展，太赫兹波时域光谱技术(TDS)已日益成熟[1-2]。在太赫兹时域光谱系统中，如何获得较宽的太赫兹频谱一直是太赫兹领域的研究人员普遍关注的问题。除了要有较宽频谱的太赫兹辐射源之外，还需要有宽频谱的太赫兹波探测器件。经科研人员长期的研究和实践发现，ZnTe 是目前在用的响应频谱较宽且探测灵敏度较高的一种电光晶体[3-4]。常规太赫兹时域光谱测量系统中飞秒激光分成两束：激发光与探测光，其中激发光照射太赫兹波发射装置进行太赫兹波信号的激发，然后通过 ZnTe 电光晶体将太赫兹波信息加载到与其在 ZnTe 晶体中重叠的探测光束上；最后利用锁相放大器或光谱仪等不同检测工具和方法将太赫兹波信号从探测光束中解调出来[5-6]。

在使用〈110〉型晶轴方向的 ZnTe 晶体作为太赫兹波探测晶体时，由于其自身的各向异性，在晶体内存在双光轴，从而形成一个折射率椭球。太赫兹波的电场通过电光效应改变其折射率椭球的取向，从而导致其对探测光透射率的变化，把这种变化信息解调下来即是所想得到的太赫兹波电场信息。因此，ZnTe 晶体晶轴方向与太赫兹波极化方向的匹配成为一个必须了解的问题。

文中通过 1 kHz 激光重复频率太赫兹实验系统研究了 ZnTe 电光晶体晶轴与太赫兹波极化的匹配关系，并通过拟合得到了经验公式，对今后理解和使用该电光晶体探测太赫兹波有一定的借鉴意义。

1 ZnTe 晶体对太赫兹波的电光响应

1.1 ZnTe 电光晶体的复折射率

ZnTe 电光晶体对可见光和红外光的折射率可以用下式近似给出[7]：

$$n(\lambda)=\sqrt{4.27+\frac{3.01\lambda^2}{\lambda^2-0.142}} \tag{1}$$

此处的 λ 是光子波长，单位为 μm。对于远低于光学范围的与频率相关的折射率，非传导晶体的复介电常数 $\varepsilon(f)$ 可以写为：

$$\varepsilon(f)=\varepsilon_{el}+\sum_j \frac{S_j f_j^2}{f_j^2-f^2-i\Gamma_j f} \tag{2}$$

此处第一项为来自束缚电子的贡献，第二项来自被认为是衰减谐振子的栅格振荡的贡献。在太赫兹频率域，ε_{el} 是常数。式中的求和包括了与电磁场相关的所有栅格振动。其他量 f_j、Γ_j、S_j 分别为本征频率，衰减常数和第 j 个栅格振荡的振荡强度。对于ZnTe 电光晶体，在太赫兹频域内可以通过限制该和到最低横向光栅格振荡[8-9]而得到关于 $\varepsilon(f)$ 的如下表达式。

$$\varepsilon(f)=\varepsilon_{el}+\frac{S_0 f_0^2}{f_0^2-f^2-i\Gamma_0 f} \tag{3}$$

通过取其平方根可以得到复折射率：

$$n(f)+i\kappa(f)=\sqrt{\varepsilon(f)} \tag{4}$$

图 1 给出了 ZnTe 电光晶体折射率和吸收函数

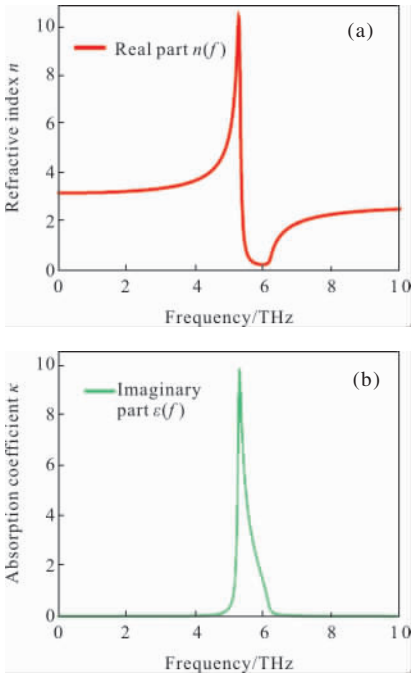

图 1 ZnTe 电光晶体的折射率(a)和吸收系数(b)

Fig.1 Refractive index (a) and (b) absorption coefficient of ZnTe electro-optic crystal

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对频率响应的计算曲线。由曲线可知在太赫兹波的低频区 (小于 4 THz)ZnTe 电光晶体对太赫兹波的色散效应并不显著,吸收系数基本恒为零。因此该晶体对小于 4 THz 的太赫兹波具有较好的电光特性。

1.2 ZnTe 对太赫兹波电光响应的计算

在光学频域和太赫兹频域,ZnTe 的折射率 n 随着波长的增加而减小。太赫兹波和波长为 800 nm 的激光脉冲在 ZnTe 电光晶体内以下面的群速度传播:

$$v_g=\frac{c}{n}\left(1+\frac{\lambda}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}\right)=\frac{c}{\left(n+f\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}f}\right)}$$

此群速度低于有贡献的谐波相速度。在 ZnTe 电光晶体中太赫兹波的相速度和群速度如图 2 所示。为了方便比较,图 2 中也给出了波长为 800 nm 激光脉冲的群速度。由计算结果可看出在低频区,太赫兹脉冲以稍高于激光脉冲的速度传播。

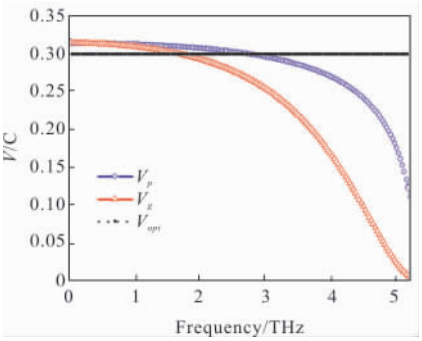

图 2 太赫兹波在 ZnTe 中的相速度和群速度

Fig.2 Phase and group velocities of terahertz wave in ZnTe crystal

对于理想的电光取样条件, 太赫兹脉冲和激光脉冲应该以同样的速度传播。速度上的差别会导致时间分辨率的降低。通常用一个依赖于太赫兹频率和晶体厚度的响应函数来标定电光效率。

$$G(f,\ d)=\frac{2}{1+n(f)+i\kappa(f)}\frac{1}{d}\int_0^d\int_{-\infty}^{\infty}\exp[i(kz-2\pi ft)]\delta(z-v_g t)\mathrm{d}t\mathrm{d}z=\frac{2}{1+n(f)+i\kappa(f)}\frac{1}{d}\int_0^d\exp\left[i2\pi fz\left(\frac{1}{v_p(f)}-\frac{1}{v_g}\right)\right]\mathrm{d}z$$

式中:$v_p(f)$为太赫兹波的相速度;v_g 为在激光波长处的光学群速度。其中的因子 $A_{\mathrm{trans}}(f)=\frac{2}{1+n(f)+i\kappa(f)}$ 是太赫兹波电场从真空进入到电光晶体中时与频率相关的传输系数。图 3 分别给出了厚度为 100 μm、300 μm、1 mm 的 ZnTe 电光晶体对太赫兹波响应函数的计算曲线。很明显,3.5 THz 的太赫兹波只能在 300 μm 以下厚度的 ZnTe 电光晶体中得到响应;4.2 THz 的太赫兹波则只能在 100 μm 以下厚度的 ZnTe 电光晶体中得到响应。横向光学栅格共振决定了在 5.3 THz 和 6.2 THz 以及后面的多个探测盲点。

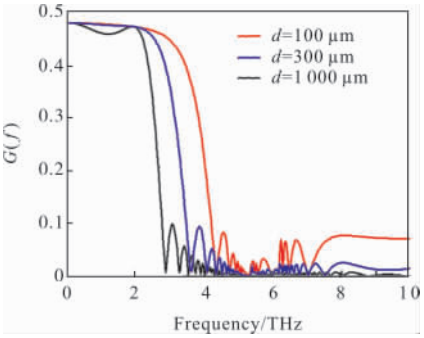

图 3 不同厚度 ZnTe 电光晶体的电光响应函数

Fig.3 Electro-optic response curves for different thickness ZnTe crystals

2 极化匹配实验

2.1 实验系统

如图 4 所示, 利用 1 000 μm 厚度的未抛光 GaAs 晶片进行了太赫兹光导天线的制作。如图 5 所示,在 1 kHz 重复频率的激光系统中,激光脉冲的波长为 800 nm,脉冲宽度为 58 fs,由于原始激光光束的光斑直径较小, 为了得到功率尽可能高的太赫兹脉冲,将激光光束进行了扩束,从而有效利用了大孔径 GaAs 光导天线高功率辐射太赫兹波的特点,同

图 4 未抛光的 GaAs 光导天线实物图

Fig.4 Picture of unpolished GaAs photoconductive antenna

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

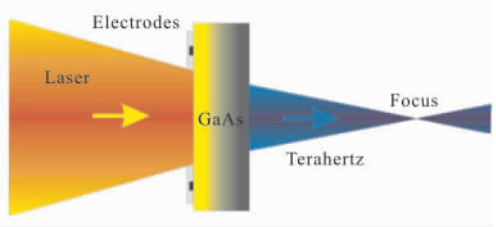

图 5 GaAs 光导天线上光路几何示意图

Fig.5 Optical geometry skeleton on the GaAs photoconductive antenna

时也为测量太赫兹波焦点处小尺寸实验样品提供了便利。

实验装置如图 6 所示，1 kHz 重复频率的激光光束从激光系统中出来后首先被分束镜分成两束：激发光和探测光。其中，激发光束经 RM_1 和 RM_2 组成的时间延迟器后，经过反射镜 RM_3–RM_5 到达由 L_1 和 L_2 构成的扩束装置进行扩束，然后照射在发射晶体 GaAs 表面上激发出太赫兹脉冲(光路如图 5 所示)。太赫兹信号经导电玻璃 ITO_1 反射，抛物面镜 PM_1 准直，导电玻璃 ITO_2 反射后，经抛物面镜 PM_2 会聚于 ZnTe 电光晶体上一点，与从分束镜分出后经反射镜 RM_6–RM_{10} 反射，穿过 ITO_2 并经 PM_2 会聚的探测光束相重合。探测光束要经过与激发光束相等的光程，以保证太赫兹信号与探测激光脉冲到达 ZnTe 电光晶体的时间同步。太赫兹信号调制 ZnTe 晶体的折射率椭球从而改变共线而来的线偏振探测激光的偏振态，从而实现对探测激光光束的调制。载有太赫兹信息的探测激光光束经过凸透镜 L_3，四分之一波片后由渥拉斯顿棱镜分成两束，分别会聚到由光电二极管组成的双眼差分探测器上转化成电信号，然后由锁相放大器进行该差分信号的放大检测，最后将该放大后的差分探测信号送入计算机，由编好的 LabView 程序进行信号的采集。

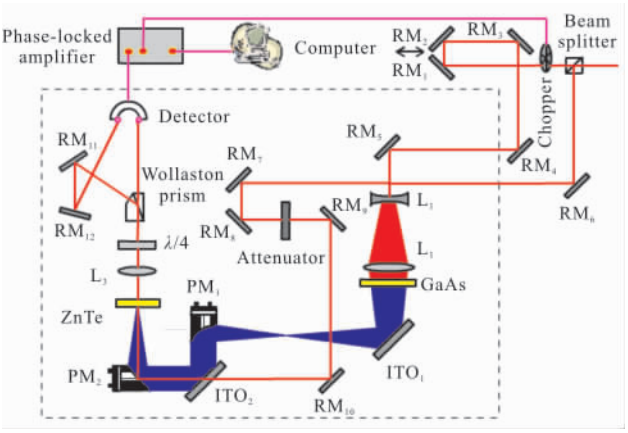

图 6 1 kHz 激光重复频率太赫兹实验系统

Fig.6 Experimental setup of the 1 kHz repetition frequency laser system

实验中，利用以上实验装置首先进行太赫兹信号的全程信息扫描，在采集程序面板上不难发现太赫兹信号的峰值，放大该位置进行精确定位后，通过采集程序移动控制系统中 RM_1–RM_2 时间延迟平台的步进电机，可以使太赫兹波电场最大值到达 ZnTe 晶体的时间与探测光束到达的时间同步，即此时的探测脉冲受太赫兹波电场的最大值所调制，然后停止步进电机的扫描，通过调节 ZnTe 电光晶体晶轴方向，改变该晶轴方向与太赫兹波极化方向之间的夹角，记录锁相放大器或采集程序面板上探测到的太赫兹信号对各个角度的响应数值。

2.2 实验结果与分析

由于实验时系统中 GaAs 发射晶体的偏置电场方向是固定的，因此太赫兹波极化方向是不变的，所以只需要调节 ZnTe 晶体晶轴方向就可以改变晶轴与太赫兹波极化方向间的夹角。锁相放大器或采集程序面板给出的响应数值是双眼探头的差分值，即探测到的太赫兹电场最大值。因此，由所得结果即可以了解电光晶体晶轴与太赫兹波极化方向的匹配关系。

图 7 给出了两次实验测量的曲线和理论模拟曲线，从其中可以看到，探测到的太赫兹电场与双眼差分探测器得到的差分电压成正比，可以近似成余弦

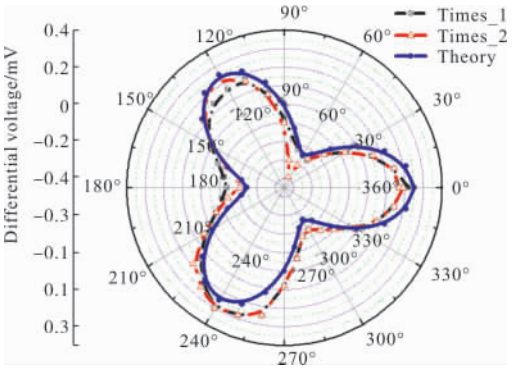

图 7 太赫兹电场最大值随晶轴与太赫兹波极化方向夹角的变化关系

Fig.7 Terahertz maximum electric field changing with the angle between the crystal axis and terahertz wave polarization direction

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关系：

$$E_{THz} \propto U_{o-e}=0.25\cos\left(\frac{\pi}{60}\theta\right)$$

式中：θ 为电光晶体晶轴方向与太赫兹波电场极化方向间的夹角，单位为(°)。图 7 中的负值表示渥拉斯顿棱镜分出的 o 光与 e 光强弱出现了颠倒，太赫兹电场信号出现了反相。

由实验结果或拟合公式可以知道，<110>晶向切割的 ZnTe 电光晶体旋转一周时，对线极化太赫兹波的响应存在着六个最佳匹配点，每隔 60°出现一次反相。以这六个最佳匹配点作为工作点时，ZnTe 电光晶体的电光转化效率最大，测量效果最佳。

3 结 论

对太赫兹波在 ZnTe 电光晶体中传输的群速度和相速度进行了分析，理论计算了不同厚度 ZnTe 电光晶体对太赫兹波脉冲探测时的频率响应宽度，找到了由晶体栅格共振所导致的多个探测频率盲点。通过极化匹配实验找到了 ZnTe 电光晶体探测线极化太赫兹波时电光效率最大的六个最佳匹配角度，为以后使用该类型电光晶体进行太赫兹波探测提供了技术参考。

参考文献：

[1] Wu Q, Zhang X C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams [J]. ***Applied Physics Letters***, 1996, 67(24): 3523-3525.

[2] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy [J]. ***Reviews of Modern Physics***, 2011, 83(2): 543-586.

[3] Red′kin R A, Bereznaya S A, Korotchenko Z V, et al. A comparison of terahertz electro-optic sampling in ZnTe, ZnSe, GaP and $GaSe_{1-x}S_x$ crystals [C]//2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015.

[4] Winnewisser C, Uhd Jepsen P, Schall M, et al. Electro-optic detection of THz radiation in $LiTiO_3$, $LiNbO_3$ and ZnTe [J]. ***Applied Physics Letters***, 1997, 70(23): 3069-3071.

[5] Meier S M, Tsankov T V, Luggenhölscher D, et al. Measurement of plasma densities by dual frequency multichannel boxcar THz time domain spectroscopy [J]. ***Journal of Physics D: Applied Physics***, 2017, 50(24): 245202.

[6] Benjamin Graber, Christopher Kim, Dong Ho Wu. High SNR single measurements of trace gas phase spectra at THz frequencies [J]. ***Applied Physics Letters***, 2017, 111(22): 221107.

[7] Marple D T. Refractive index of ZnSe, ZnTe and CdTe [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1964, 35(3): 539-542.

[8] Wu Q, Zhang X C. Ultrafast electro-optic field sensors [J]. ***Applied Physics Letters***, 1996, 68(12): 1604-1606.

[9] Wu Q, Liz M, Zhang X C. Broadband detection capability of electro-optic field probes [J]. ***Applied Physics Letters***, 1996, 68(21): 2924-2926.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net