

太赫兹时域光谱中脉冲太赫兹波全息探测*

王志全¹⁾²⁾ 施卫^{1)2)†}

1) (西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

2) (西安理工大学, 陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室, 西安 710048)

(2022 年 5 月 17 日收到; 2022 年 8 月 1 日收到修改稿)

在太赫兹 (THz) 波与材料相互作用的研究中, 传统的太赫兹时域光谱 (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 通常仅探测某一偏振方向的脉冲 THz 波在与待测样品作用前后的幅值信息和相位信息的变化. 然而对于各向异性、手性特征等材料的检测中, 仅有样品的幅值和相位信息并不能给出样品物质完整的内在结构. 各向异性、手性物质对不同偏振态的脉冲 THz 是非常敏感的, 要通过 THz 光谱来反映这些手性物质的构型、构象等信息, 就必须探测脉冲 THz 波作用样品前后的振幅、相位和偏振态. 本文提出的脉冲 THz 波全息探测器 (pulsed terahertz holographic detector, PTHD) 由相互垂直的光电导天线阵元组成, 可以通过一次扫描检测出脉冲 THz 电场在任意方向的正交分量, 从而可同时检测出脉冲 THz 波作用样品前后的振幅、相位和偏振态的变化, 故称为脉冲 THz 波全息探测器. 实验和理论分析都验证了 PTHD 测量脉冲 THz 波偏振态的可靠性. 同时, 本文还利用响应矩阵分析了 PTHD 在 0.1—2.2 THz 光谱范围内具有良好的对称性.

关键词: 脉冲太赫兹波, 偏振态, 响应矩阵, 偏振度**PACS:** 87.50.U-, 42.25.Ja, 11.55.-m, 42.81.Gs**DOI:** 10.7498/aps.71.20220983

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是指频率在 0.1 到 10 THz 之间的电磁波, 这个区间覆盖了红外和微波光谱范围之间的电磁波谱部分^[1]. 在太赫兹时域光谱 (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 中, 根据 THz 波电场的时域信号的傅里叶变换获取 THz 电场的频谱信息, 由此可将 THz-TDS 应用于安检^[2,3]、成像^[4,5]、食品检测^[6,7] 以及材料无损检测^[8–10] 等领域的研究, 此外, 由于 THz 单光子能量较低, 且恰好落在生物分子的转动和振动能级范围内^[11–13], 可应用于生物分子学的研究.

随着对 THz 波与物质相互作用研究的深入, 对 THz-TDS 的测量技术要求也越来越高. THz-TDS 的核心部件包括一个脉冲 THz 波辐射源和一

个脉冲 THz 波探测器, 而偶极子光电导天线是常用的脉冲 THz 波辐射源和脉冲 THz 波探测器^[14]. 典型的偶极子光电导天线辐射源辐射线偏振脉冲 THz 波, 通过改变脉冲 THz 光电导发射天线的电极形状和坐标朝向获得任意偏振态和偏振方向的 THz 电场^[15], 而偶极子光电导天线探测器的特征是仅测量脉冲 THz 电场在其电极间隙方向上的一个投影分量, 而这个投影分量穿过材料后的幅值下降被解释为由材料吸收和散射引起的^[16], 其相位变化仅能分析材料在这一个投影分量方向上的折射率. 然而, 在各向异性、手性特征等样品材料与 THz 波的相互作用中, 不同偏振方向和偏振态的 THz 脉冲不仅在材料内部的折射率和吸收系数不同, 而且材料的入射面和材料的旋转角度的变化也将导致不同的测量结果, 因此, 对这类材料的研究中需要获取与材料作用前后 THz 脉冲在幅值、相

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0701005) 和国家重大科研仪器设备研制专项 (批准号: 61427814) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

位、偏振态和偏振方向的全部变化信息, 而仅靠测量 THz 脉冲在某一方向的投影分量不足以理解材料在 THz 波段的所有光学特性. 例如在利用传统方法对脉冲 THz 波和手性材料相互作用的研究中, 与左旋和右旋特性材料作用后的 THz 信号幅值和相位信息是相同的, 导致二者吸收光谱、折射率谱是没有任何区分的^[17]. 然而, 在 THz 波段, 左手性和右手性材料的圆二色性 (terahertz circular dichroism, TCD) 和光学旋转色散 (terahertz optical rotary dispersion, TORD) 等特性是不同的^[17], 因此, 利用脉冲 THz 波全息探测器对这类材料的研究是必需的和有意义的.

Makabe 等^[18]报道了一种 3 电极结构的 THz 波偏振探测器, 相邻电极之间成 120° 角, 该探测器带宽为 1.75 THz, 检测角灵敏度为 0.2° , 动态范围约 10^6 , 但由于不是经典的正交分量的检测方法, 因此需要对采集数据进一步处理才有意义. Bulgarevich 等^[19]设计了一种 4 电极结构的光电导天线阵列探测器, 该探测器具有四重结构对称性, 直观上似乎与正交极化都同等地相互作用, 他们研究了探测器对入射偏振角的线性角响应, 实验结果与 FDTD 模拟结果具有一致性, 但激光探测光束轻微的、偏离中心的对准将造成角度检测响应的不对称性. Niehues 等^[20]对 4 电极结构探测器进行了电极引线结构的优化, 并利用响应矩阵对该 THz 波偏振探测器进行了分析, 结果表明电极引线将通过影响 THz 波偏振探测器的对称性进而影响探测的准确性, 而且该 THz 波偏振探测器仅适用于 0.25—0.8 THz 范围内的 THz 偏振电场的检测. 然而, 以上三种 THz 波偏振探测器面临着同一个缺点: 需要对激光光束对探测天线间隙的高度精确对准, 且接收脉冲 THz 波的有效区域不可拓展. 文献^[21, 22]设计了一种高效的 2×2 THz 波光电导天线阵列探测器, 该 THz 波探测器通过切割相邻天线阵元之间的衬底材料消除了天线阵元之间的反向电流, 通过对阵元和阵列的单独测试, 获得了最高 99.9% 的振幅合成效率, 同时基于这种高合成效率的特性, 设计了阵列的 THz 脉冲偏振探测器, 这对于提高探测器的信噪比和探测灵敏度具有重要意义.

在脉冲 THz 波偏振测量技术中, 传统的脉冲 THz 波探测器 (电光晶体、偶极子光电导天线等) 需多次旋转探测器或太赫兹偏振片^[15,23], 但探测过

程耗时较长、程序繁多. 而光电导天线阵列探测器则可一次性测量多通道信号, 使用方便且用时较少, 可应用于脉冲 THz 波偏振探测的研究, 但目前该类型脉冲 THz 波探测器还存在接收脉冲 THz 波的有效区域不可拓展或相邻电极之间的反向电流干扰等问题.

本文设计了一种基于砷化镓光电导天线阵列的 PTHD, PTHD 可探测任意方向 THz 脉冲在水平和竖直方向的正交偏振分量, 并由此获得 THz 电场的幅值、相位、偏振态和偏振方向. 通过实验测试 PTHD 在不同角度下响应 THz 电场的正交偏振分量, 进一步分析 PTHD 的对称性, 利用 Stokes 参量计算全部偏振信息, 利用琼斯矩阵研究 PTHD 对各向异性材料的量化和手性材料的表征, 以及利用 PTHD 进行天线辐射源处于不同激光激励状态下辐射 THz 波偏振度 (dependent degree of polarization, DOP) 的研究. 此外, 该 PTHD 接收 THz 波的有效区域面积是可扩展的, 同时消除拓展后相邻天线阵元之间的反向电流干扰, 这有利于提高探测器的信噪比和检测灵敏度.

2 PTHD 设计及实验装置

2.1 PTHD 的设计

PTHD 的设计如图 1(a) 所示. 光电导天线的基底材料是采用分子束外延系统在 (100) 方向的半绝缘砷化镓 (semi-insulating gallium arsenide, SI-GaAs) 上生长的低温砷化镓 (low temperature gallium arsenide, LT-GaAs), 通过电子束蒸发工艺将 Ni/Au-Ge/Au 混合物沉淀在 LT-GaAs 上, 并通过快速热退火 (rapid thermal annealing, RTA) 将其金属化, 通过精确控制 RTA 的时间和温度, AuGeNi 合金电极与 LT-GaAs 衬底形成欧姆接触. 偶极天线长度 $l = 990 \mu\text{m}$, 电极长度 $h = 990 \mu\text{m}$, 偶极间隙 $g = 50 \mu\text{m}$, 天线阵元有源区域 $0.03 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$, PTHD 包含两个相互垂直的光电导天线阵元, 分别以天线 A, B 区分, 用以分别探测正交分量的脉冲太赫兹波, 图中红点表示 PTHD 旋转轴位置, 并利用黑色曲线表示电极引线, 引线连接至同轴电缆并输出到锁相放大器. 实验中需设置 PTHD 几何中心、激光光斑中心和 THz 光斑中心重合, 具体方法为通过旋转 PTHD 角度为 45° ,

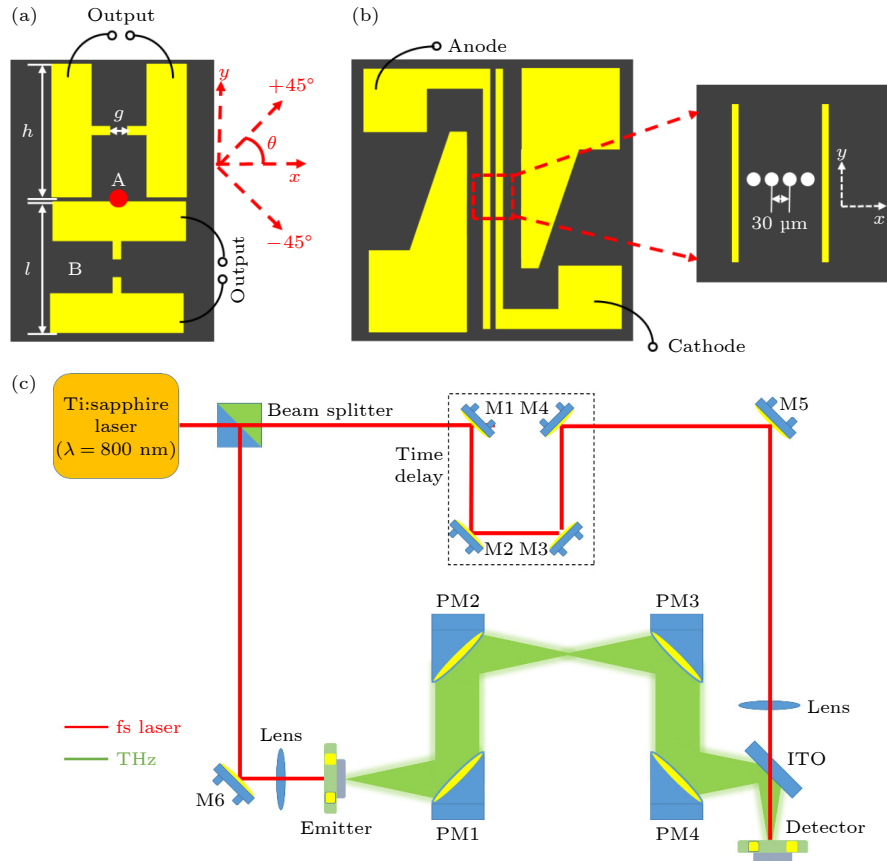


图 1 (a) PTHD 结构; (b) THz 波辐射天线结构; (c) THz-TDS 光路示意图

Fig. 1. (a) Structure of PTHD; (b) the structure of the THz wave radiating antenna; (c) schematic diagram of THz-TDS optical path.

调节所有天线阵元通态电阻相等且接收正交分量的 THz 信号强度相同. 所用脉冲 THz 辐射天线为基于 LT-GaAs 的光电导天线, 其间隙为 150 \$\mu\text{m}\$, 图中引线处标识分别代表对辐射天线施加外置偏置电压的阳极和阴极, 辐射 THz 电场沿 \$y\$ 轴方向偏振, 如图 1(b) 及其局部放大所示.

2.2 实验装置

如图 1(c) 所示, THz-TDS 所用激光器为波长 800 nm、脉宽 70 fs、重频 80 MHz 的钛蓝宝石激光器 (spectra-physics, MaiTai XF-1), 经过分束镜的飞秒激光一束用于对发射天线进行激励, 泵浦功率为 200 mW, 辐射天线偏置电压为 300 V. 脉冲 THz 波经过两对离轴抛物面镜被聚焦到 PTHD, 第三个离轴抛物面镜后 THz 波聚焦光斑直径约 3 mm. 另一束光经过延迟线和聚焦透镜后被聚焦在 PTHD 上, 将激光光斑直径调整为 3 mm, 探测光功率为 105 mW.

3 脉冲 THz 偏振检测分析

PTHD 的结构对称性可以由响应矩阵进行分析,

$$\begin{pmatrix} S_A(\omega) \\ S_B(\omega) \end{pmatrix} = \mathbf{M}(\omega) \begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 \$\omega\$ 是 THz 波段的电磁波频率; \$E_x(\omega)\$ 和 \$E_y(\omega)\$ 分别表示入射 THz 电场在 \$x\$ 和 \$y\$ 方向的频谱信号分量; \$S_A(\omega)\$ 和 \$S_B(\omega)\$ 是 PTHD 响应的时域信号 \$S_A(\tau)\$ 和 \$S_B(\tau)\$ 经傅里叶变换后的复频谱振幅; \$\mathbf{M}(\omega)\$ 为响应矩阵,

$$\mathbf{M}(\omega) = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

定义 \$x\$ 轴方向为水平方向, 当 PTHD 相对于 \$x\$ 轴旋转 \$\theta\$ 角时,

$$\begin{pmatrix} S_{A,\theta}(\omega) \\ S_{B,\theta}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{0x}(\omega) \\ E_{0y}(\omega) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 \$E_{0x}\$ 和 \$E_{0y}\$ 为初始恒定的电场分量. 为了便于

讨论, 省略了参数 M , E_{0x} , E_{0y} , S 和 m_i 对频率 ω 的依赖. 根据探测器在 $\theta = \pm 45^\circ$ 时的探测数据, 可以计算出响应矩阵为

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}E_{0x}} \begin{pmatrix} S_{A,45^\circ} + S_{A,-45^\circ} & 0 \\ 0 & S_{B,45^\circ} - S_{B,-45^\circ} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

为了表征 THz 电场的线偏振程度, 使用偏振度 DOP 来描述, DOP 是与频率相关的, 可描述为

$$\text{DOP}(f) = \frac{I_{//}(f) - I_{\perp}(f)}{I_{//}(f) + I_{\perp}(f)}, \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} I_{//}(f) &= |S_{A,0}|^2, \\ I_{\perp}(f) &= |S_{B,0}|^2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $I_{//}(f)$ 和 $I_{\perp}(f)$ 分别为 $\theta = 0^\circ$ 时天线阵元 A, B 对 THz 电场长轴分量和短轴分量响应的光谱强度.

同时, 可以使用 Stokes 参数表征 THz 电场的偏振方位角 ψ :

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{A,0}^2 + S_{B,0}^2 \\ S_{A,0}^2 - S_{B,0}^2 \\ 2S_{A,0}S_{B,0}\cos\delta \\ 2S_{A,0}S_{B,0}\sin\delta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right), \quad (8)$$

其中 δ 为 x 方向和 y 方向偏振 THz 波之间的相位差.

对于各向异性和手性材料的表征, 需要两组入射电场和出射电场的测量, 且两组入射电场和样品之间具有不同的相对方向. 入射电场为水平偏振的太赫兹波, 将 PTHD 探测穿过样品后的水平和垂直分量记为 $S_{SA}^{(n)}, S_{SB}^{(n)}$, n 表示第 n 次测量. 由琼斯矩阵

$$T = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{yx} \\ t_{xy} & t_{yy} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中矩阵因子的第一下标字母表示入射偏振方向, 第二下标表示用于检测穿过样品的出射偏振方向.

为方便起见, 入射电场偏振方向与样品方向之间相对角度设定为 α , 样品初次测量, 设定 $\alpha = 0^\circ$, PTHD 接收到的太赫兹波正交极化分量为

$$\begin{pmatrix} S_{SA}^{(1)} \\ S_{SB}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{yx} \\ t_{xy} & t_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{\text{ref}} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

其中 S_{ref} 表示 PTHD 探测到的穿过空气的太赫兹波信号. 样品二次测量, 样品旋转角度 $\alpha = 90^\circ$, PTHD 接收到的太赫兹正交极化分量为

$$\begin{pmatrix} S_{SA}^{(2)} \\ S_{SB}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{yx} \\ t_{xy} & t_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{\text{ref}} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

由 (10) 式和 (11) 式可得

$$T = \begin{pmatrix} \frac{S_{SA}^{(1)}}{S_{\text{ref}}} & \frac{S_{SB}^{(2)}}{S_{\text{ref}}} \\ \frac{S_{SB}^{(1)}}{S_{\text{ref}}} & \frac{S_{SA}^{(2)}}{S_{\text{ref}}} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

通过先后改变入射电场和样品之间的相对方向, 利用 PTHD 分别探测这两组与频率相关的复振幅太赫兹信号 S_{SA} , S_{SB} 及参考复振幅太赫兹信号 S_{ref} , 根据 (12) 式进而获取琼斯矩阵因子参数. 由已知的琼斯矩阵, 材料的各向异性可由与频率相关的线二色性 (terahertz linear dichroism, TLD) 进行量化^[24]:

$$\text{TLD} = \frac{\sqrt{|t_{xx}|^2 + |t_{xy}|^2} - \sqrt{|t_{yx}|^2 + |t_{yy}|^2}}{\sqrt{|t_{xx}|^2 + |t_{xy}|^2} + \sqrt{|t_{yx}|^2 + |t_{yy}|^2}}. \quad (13)$$

同理, 手性物质对太赫兹波左旋波和右旋波的吸收度不同, 该值可由 TCD 进行表征^[24], 且左手性和右手性物质的 TCD 正负相反, 在样品定量的情况下 TCD 大小相等且正负相反, 因此可根据琼斯矩阵研究手性物质的 TCD 光谱特性,

$$\text{TCD} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{|t_{xx} + it_{yx}|^2 + |t_{xy} + it_{yy}|^2} - \sqrt{|t_{xx} - it_{yx}|^2 + |t_{xy} - it_{yy}|^2}}{\sqrt{|t_{xx} + it_{yx}|^2 + |t_{xy} + it_{yy}|^2} + \sqrt{|t_{xx} - it_{yx}|^2 + |t_{xy} - it_{yy}|^2}} \right). \quad (14)$$

4 实验结果与分析

在 $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 范围内, 实验测试了 PTHD 对 THz 电场的响应, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 角度变化步长为 15° . 为便于展示, 将天线在不同角度下响应的时域信号依次偏移 8 ps, 辐射天线的偏置电场是固定的. PTHD 在旋转过程中 THz 电场在天线阵元 A, B 上的投影分量的变化是显而易见的, 当 $\theta < 0^\circ$ 时, 天线阵元 B 所接收信号的电极发生对调, 所接收信号峰值为负. 通过拟合天线阵元 A, B 所接收到的 THz 电场振幅的峰峰值 (所有信号幅值峰峰值均取值为正) 发现, 其峰峰值变化符合马吕斯定律, 这表明 PTHD 在应用于偏振探测时的可靠性, 如图 2(c) 所示; 并根据 $E_{\text{THz}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ 计算 PTHD 在不同角度下所响应到 THz 电场的幅值变化, 拟合结果显示 PTHD 在 180° 范围内太赫兹幅值变动小于 7%, 表明 PTHD 探测太赫兹波具有稳定性. 图 2(d) 展示了天线阵元 A 在

$0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时探测天线的频谱, 频谱宽度 2.2 THz, 动态范围约 55 dB.

为分析 THz 电场的椭圆偏振态, 图 3(a) 展示了天线阵元 A, B 分别探测到的水平和竖直偏振分量的信号对比. 为便于观察, 将天线阵元 B 的信号放大 5 倍, 绿色圆圈标记的为脉冲 THz 前沿, 可以观察到明显的相位延迟, 并描绘出此部分的脉冲 THz 电场的空间轨迹, 如图 3(b) 所示, E_H , E_V 分别表示水平和竖直偏振分量的幅值, THz 电场表现为椭圆偏振态. 根据 (5) 式和 (8) 式计算出与频率相关的偏振态 DOP(f) 和 THz 电场方位角, 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 在 0.1—1.5 THz 范围内, THz 电场的偏振度均大于 98%, 在 0.1—1.5 THz 范围内, THz 电场的偏振度均大于 99.7%. 由 (8) 式提取复频谱信号中的相位和振幅, 通过计算与频率相关的 Stokes 参量 (S_1 , S_2 , S_3), 在 0.1—1.5 THz 范围内可获取 THz 电场方位角 ψ 在 -1.29° — 15.67° 之间随频率变化, 如图 3(d) 所示, 在 1.39 THz 处, THz 电场的方位角达到最大为 15° .

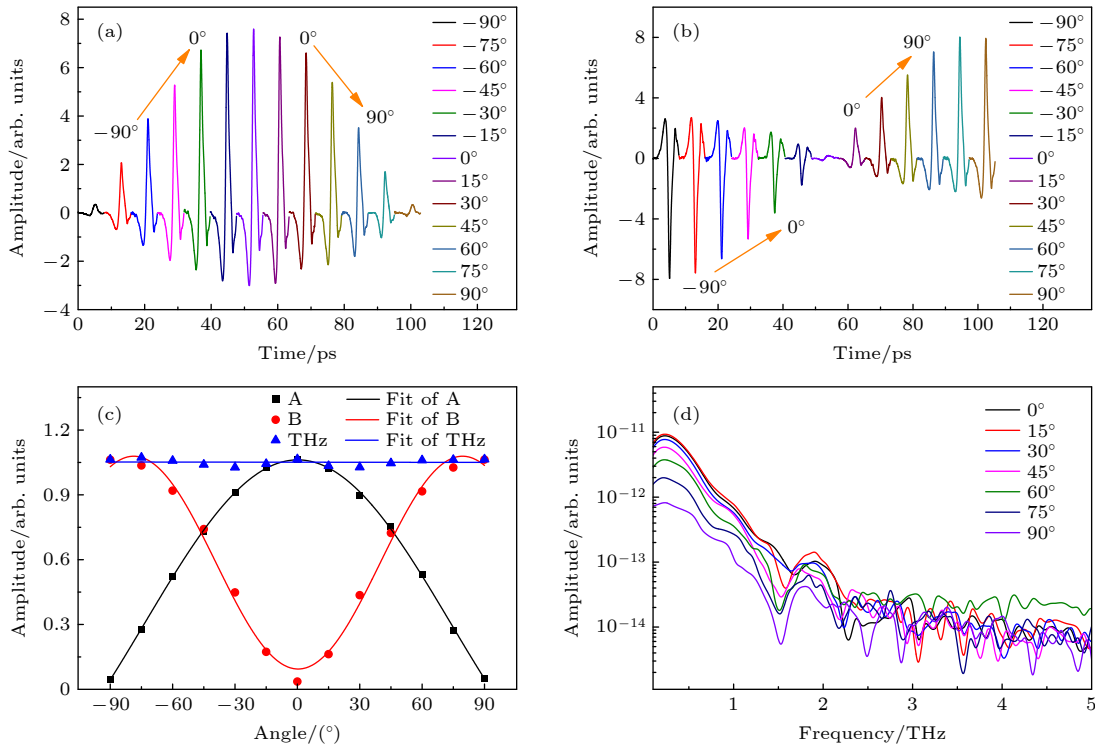


图 2 PTHD 在不同角度下天线 A (a) 和天线 B (b) 的 THz 电场响应; (c) 天线阵元 A, B 响应的 THz 电场振幅的拟合及 THz 信号幅值的拟合; (d) 天线 A 响应时域信号的傅里叶变换

Fig. 2. The THz electric field responses of antenna A (a) and antenna B (b) of the PTHD at different angles; (c) the fitting of the THz electric field amplitudes responded by the antenna A and B and the fitting of the THz signal amplitudes; (d) Fourier transform of the time domain signal received by antenna A.

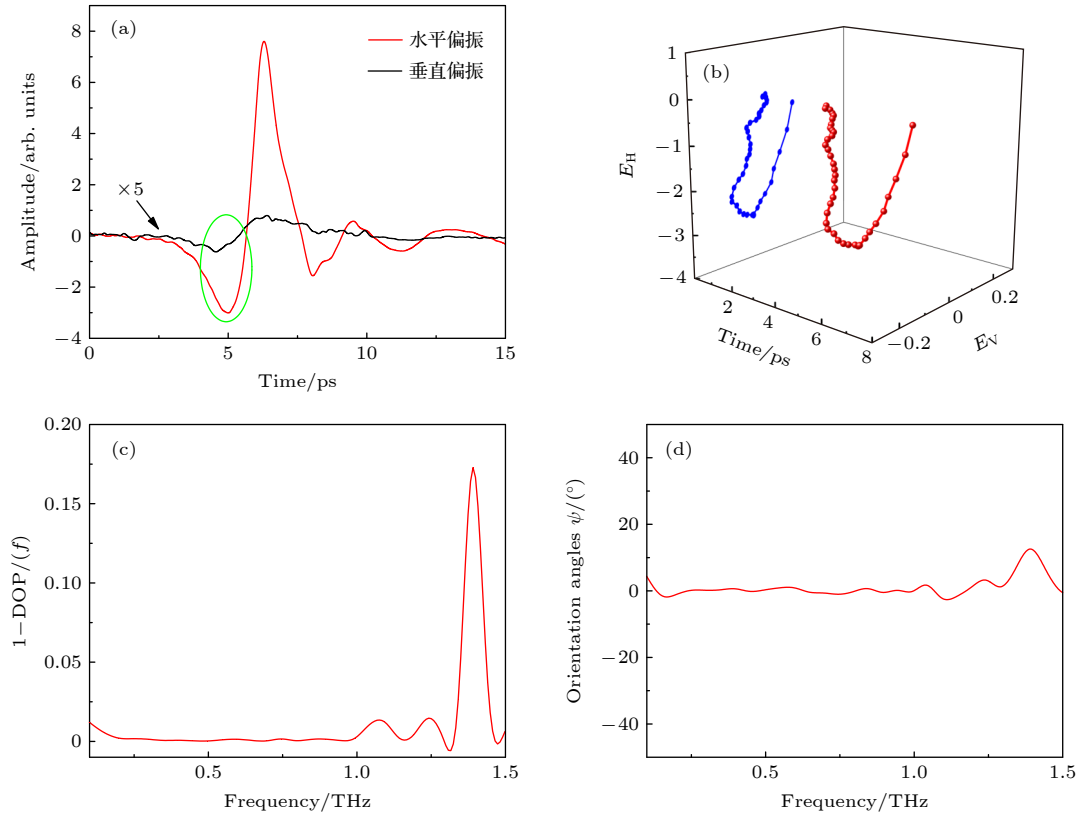


图 3 (a) 水平和竖直偏振的 THz 时域信号; (b) 图 (a) 绿色圆圈部分的 THz 脉冲的空间轨迹; 与频率相关的 (c) DOP 和 (d) THz 电场方位角

Fig. 3. (a) THz time domain signal of horizontal and vertical polarization; (b) spatial trajectories of THz pulses in the green circle part of panel (a); frequency-dependent (c) DOP and (d) THz electric field orientation angles.

为计算响应矩阵, 将探测器置于 $\theta = \pm 45^\circ$ 下, 通过对天线 A, B 阵元获得的时域谱进行傅里叶变换得到复频谱, 结合 (4) 式计算出响应矩阵因子 m_1 和 m_2 , 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 在 0.1—0.22 THz 的实部和 0.1—0.28 THz 的虚部, $m_1 \neq m_2$, m_1 和 m_2 之间的偏差可以由以下几个方面解释: 1) THz-TDS 系统信噪比影响矩阵因子计算的准确性; 2) m_1 和 m_2 的实部和虚部之间的振幅差异随频率的增加而减小, 而高频部分的矩阵因子 $m_1 = m_2$, 这是由电极表面引线的不对称性引起的; 3) PTHD 的几何中心与旋转支架转轴之间的偏移产生的系统误差. 因此, (2) 式的响应矩阵可简化为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} l & 0 \\ 0 & k \end{pmatrix}, \quad (15)$$

其中 l 和 k 都是常数且为复值, 在高频部分 $l = k$, PTHD 的电极结构达到理想的对称性, 这对 THz 波偏振探测具有重要意义.

同时, PTHD 可应用于脉冲 THz 波的 DOP 检测. 为保证 DOP 检测的精确性, 进行了多组探

测, 对发射天线沿 x 轴方向对 150 μm 的间隙划分为 4 个飞秒激光触发点, 触发点间隔为 30 μm , 如图 1(b) 的扩大图所示, 同时将 PTHD 置于 $\theta = 0^\circ$. 如图 5(a) 所示, 不同的激光触发点所激发的 THz 波时域信号强度存在差异, 距离阳极越近, 辐射 THz 波强度越强, 其中天线阵元 A, B 分别表示探测到的水平和垂直偏振电场分量, 根据天线阵元 A, B 所接收信号的幅值及相位偏移可初步判断 THz 电场的椭圆偏振特性. 如图 5(b) 所示, 由 (5) 式和 (6) 式得到与频率相关的 DOP(f) 可做如下分析: 1) 四组 DOP(f) 的曲线差异是由于辐射天线辐射强度差异造成的; 2) 不同频率下, THz 脉冲电场的偏振度不同, 在 0.1—1.5 THz 范围内, DOP 均达到 90% 以上, 在 0.9 THz 处, DOP 均达到 99.9%, 处于线偏振状态, 在 0.9 THz 以上, THz 电场的椭圆偏振程度逐渐变大, 尤其在 1.5 THz 以上 DOP 迅速降低; 3) 四组 DOP(f) 的幅值和变化趋势几乎是一致的, 这表明 PTHD 用于脉冲 THz 偏振检测的可靠性.

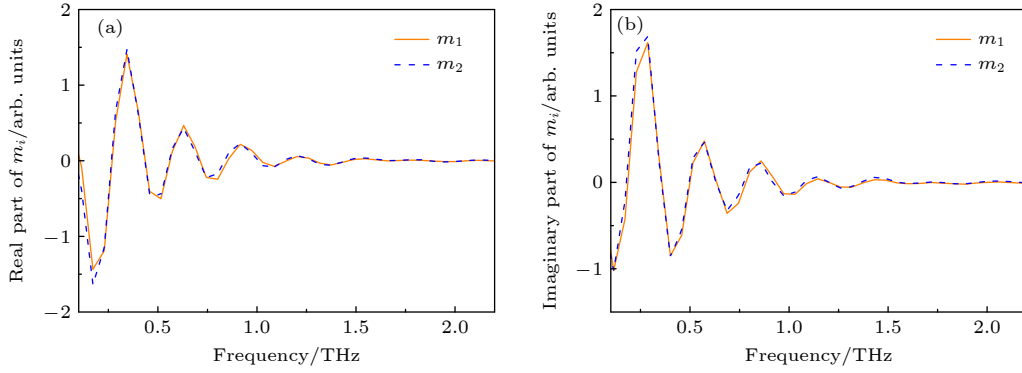
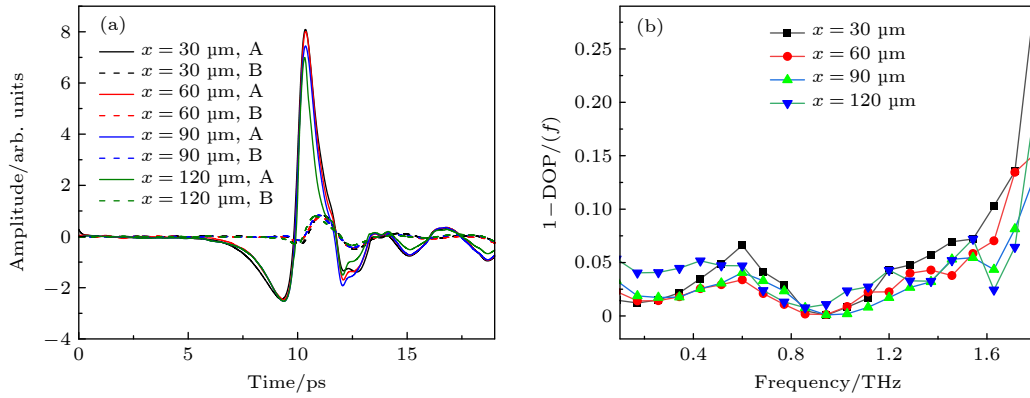
图 4 响应矩阵因子 m_1 和 m_2 的实部 (a) 和虚部 (b) 与频率的依赖关系Fig. 4. Frequency dependence of the real (a) and imaginary (b) parts of the response matrix factors m_1 and m_2 .

图 5 辐射天线间隙内不同位置激发的 (a) THz 时域信号以及 (b) 相应的 DOP(f)

Fig. 5. (a) THz time domain signal and (b) corresponding DOP(f) excited at different positions of the radiating antenna gap.

5 结 论

本文设计了一种可应用于研究 THz 波与各向异性、手性特征等对偏振敏感材料相互作用的 PTHD. 相比于传统的光电导 THz 波探测器, THz 波全息探测器可通过一次测量, 获取任意 THz 电场振幅、相位、偏振态和偏振方向的全部信息, 实验测试了 PTHD 在不同角度下对太赫兹波正交分量的探测, 结果表明了探测器用于脉冲 THz 波偏振探测的稳定性和可靠性, 响应矩阵的分析表明该探测器具有良好的对称性, 同时对辐射天线的研究也表明了 PTHD 用于脉冲 THz 波偏振探测的可靠性. 此外, PTHD 接收 THz 波的有效区域是可拓展为 $N \times N$ 阵列的, 且无相邻阵元间的反向电流干扰. 实验与理论分析都表明了 PTHD 在 0.1—2.2 THz 光谱范围内用于 THz 电场偏振测量的可靠性以及良好的结构对称性.

参考文献

[1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26

- [2] Zimdars D, White J S 2004 *Terahertz for Military and Security Applications II* Orlando, Florida, United States, April 12–16, 2004 pp78–83
- [3] Hoshina H, Sasaki Y, Hayashi A, Otani C, Kawase K 2009 *Appl. Spectrosc.* **63** 81
- [4] Kawase K, Shibuya T, Hayashi S I, Suizu K 2010 *C. R. Phys.* **11** 510
- [5] Federici J F, Schulkin B, Huang F, Gary D, Barat R, Oliveira F, Zimdars D 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** S266
- [6] Ok G, Park K, Chun H S, Chang H J, Lee N, Choi S W 2015 *Biomed. Opt. Express* **6** 1929
- [7] Shen F, Ying Y B 2009 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **29** 1445
- [8] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L 2008 *Opt. Express* **16** 17039
- [9] Zhong S C 2019 *Front. Mech. Eng.* **14** 273
- [10] Tao Y H, Fitzgerald A J, Wallace V P 2020 *Sensors* **20** 712
- [11] Takahashi M 2014 *Crystals* **4** 74
- [12] Menikh A, Mickan S P, Liu H, MacColl R, Zhang X C 2004 *Biosens. Bioelectron.* **20** 658
- [13] Penkov N V, Yashin V A, Belosludtsev K N 2021 *Appl. Spectrosc.* **75** 189
- [14] Smith P R, Auston D H, Nuss M C 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 255
- [15] Lu X, Zhang X C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 123903
- [16] Zhang L, Zhong H, Deng C, Zhang C, Zhao Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 211106
- [17] Choi W J, Yano K, Cha M, Colombari F M, Kim J Y, Wang Y, Lee S H, Sun K, Kruger J M, de Moura A F 2022 *Nat. Photonics* **16** 366

- [18] Makabe H, Hirota Y, Tani M, Hangyo M 2007 *Opt. Express* **15** 11650
- [19] Bulgarevich D S, Watanabe M, Shiwa M, Niehues G, Nishizawa S, Tani M 2014 *Opt. Express* **22** 10332
- [20] Niehues G, Funkner S, Bulgarevich D S, Tsuzuki S, Furuya T, Yamamoto K, Shiwa M, Tani M 2015 *Opt. Express* **23** 16184
- [21] Shi W, Wang Z Q, Hou L, Wang H Q, Wu M L, Li C F 2021 *Front. Phys.* **9** 751128
- [22] Shi W, Wang Z, Li C, Hou L, Pan Y 2022 *Front. Phys.* **10** 850770
- [23] Bulgarevich D S, Shiwa M, Niehues G, Tani M 2015 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **5** 1097
- [24] Rodger A, Nordén B 1997 *Circular Dichroism and Linear Dichroism* (Vol. 1) (New York: Oxford University Press) pp15–44

Holographic detection of pulsed terahertz waves in terahertz time-domain spectroscopy*

Wang Zhi-Quan¹⁾²⁾ Shi Wei^{1)2)†}

1) (*Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

2) (*Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric Technology and Terahertz Science in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

(Received 17 May 2022; revised manuscript received 1 August 2022)

Abstract

In the study of the interaction of terahertz (THz) wave with material, the traditional THz time-domain spectroscopy (THz-TDS) usually only detects the changes in amplitude and phase information of pulsed THz in a certain polarization direction before and after the interaction with the sample to be tested. However, in the detection of material such as anisotropic material and chiral material, only the amplitude and phase information of the sample cannot give the complete internal structure of the sample material. Anisotropic material and chiral material are very sensitive to pulsed THz of different polarization states. In order to reflect the configurations and conformations of these chiral substances through THz spectrum, it is necessary to detect the amplitude, phase and polarization state of the sample before and after pulse THz waves. The pulsed terahertz holographic detector (PTHD) in this work is composed of photoconductive antenna elements that are perpendicular to each other. The quadrature component of the pulsed THz electric field in any direction can be detected by one-time scanning, so that the changes in amplitude, phase and polarization state before and after the pulsed THz wave acts on the sample can be detected at the same time, so it is called pulsed THz wave holographic detection. Both experiments and theoretical analyses verify the reliability of the PTHD for measuring the polarization state of pulsed THz waves. At the same time, the response matrix is used to analyze that the PTHD has good symmetry in a spectral range of 0.1–2.2 THz.

Keywords: terahertz waves, state of polarization, response matrix, degree of polarization

PACS: 87.50.U–, 42.25.Ja, 11.55.–m, 42.81.Gs

DOI: 10.7498/aps.71.20220983

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0701005) and the Special Fund for Research on National Major Research Instruments and Facilities of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61427814).

† Corresponding author. E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

太赫兹时域光谱中脉冲太赫兹波全息探测

王志全 施卫

Holographic detection of pulsed terahertz waves in terahertz time-domain spectroscopy

Wang Zhi-Quan Shi Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 188704 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220983

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220983>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹波生物效应

Biological effects of terahertz waves

物理学报. 2021, 70(24): 240701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211996>

太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

α -乳糖水溶液太赫兹吸收光谱实验研究及模拟分析

Experimental study and simulation analysis of terahertz absorption spectra of α -lactose aqueous solution

物理学报. 2021, 70(24): 243202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211716>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

太赫兹实时近场光谱成像研究

Research on terahertz real-time near-field spectral imaging

物理学报. 2022, 71(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220131>