

基于会聚太赫兹光场纵向分量的物质琼斯矩阵测量技术

刘耘妃, 王新柯*, 孙文峰, 张岩

首都师范大学物理系, 北京 100048

摘要 提出一种在太赫兹波段检测物质琼斯矩阵的方法。利用太赫兹面阵成像系统对会聚太赫兹光场的纵向分量进行相干测量, 由此提取太赫兹光场的偏振信息, 并通过分别测量未放置样品、放置原始样品和样品旋转 90° 后的透射太赫兹光场偏振信息, 提取样品的琼斯矩阵元素。利用此方法, 分别对不同角度的太赫兹偏振片和波片进行了实验测量, 并与理论结果进行比较, 发现具有很好的一致性。研究结果说明, 所提方法对表征物质在太赫兹波段的各向异性特征具有很好的实用性。

关键词 太赫兹; 纵向分量; 琼斯矩阵; 偏振

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230638

Measurement Technique for Extracting Jones Matrix of Substances Based on Longitudinal Component of Converging Terahertz Beam

Liu Yunfei, Wang Xinke*, Sun Wenfeng, Zhang Yan

Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract Herein, a method for extracting the Jones matrix of a material in the terahertz (THz) wave band is proposed. A THz focal-plane imaging system was utilized to coherently measure the longitudinal component of a converging THz field and to determine the THz polarization. Furthermore, the Jones matrix of the material was extracted by measuring the polarization of a reference THz field and the polarizations of the THz fields transmitted from a sample in its original position and with a 90° rotation. The proposed method was employed to measure the Jones matrices of a THz polarizer and a wave plate with different azimuthal angles, and the experimental results were consistent with theoretical calculations. This demonstrated the feasibility of the proposed method to characterize the anisotropy of materials in the THz frequency range.

Key words terahertz; longitudinal component; Jones matrix; polarization

1 引言

随着远红外光学技术的发展, 太赫兹 (1 THz = 10^{12} Hz) 频率范围内的偏振光谱技术正在成为一个重要的研究方向并受到了学者们的广泛关注^[1-2]。众所周知, 光场的偏振态会受到物质二向色性^[3]、双折射^[4-6]、旋光^[7-8]效应等的影响, 因此偏振光谱技术可以用于检测不同类型材料的各向异性特征。目前, 此技术已经在超材料^[9-10]、半导体^[11]、生物分子^[12-13]、聚合物复合材料^[14-15]和液晶^[16-17]等各个研究领域得到了广泛应用。描述物质对光场偏振态影响的方法一般有两

种, 即穆勒矩阵^[18]和琼斯矩阵^[19]。对于相干光场, 琼斯矩阵方法的实用性更强, 它可以更加简单直观地描述物质对入射光场的矢量传输特性, 因此能够准确测定物质的琼斯矩阵对发展偏振光谱技术是十分重要的。

在太赫兹波段提取物质琼斯矩阵的前提是能够准确测量太赫兹光场的偏振态。目前测量太赫兹偏振态的主流技术主要包括特殊结构的光导天线和改进的电光采样技术。例如, 2015年 Niehues 等^[20]利用四电极的光导天线测量了太赫兹偏振片对太赫兹光场的调制。2018年 Sanjuan 等^[21]利用 $\langle 111 \rangle$ 方向的 ZnTe 晶体改进了太赫兹时域光谱系统, 通过调整飞秒激光的

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-03-27; 网络首发日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金 (62275175)

通信作者: *wxk82721@cnu.edu.cn

偏振态来产生与探测具有不同偏振态的宽带太赫兹脉冲。2019 年 Zhao 等^[22]利用传统的电光采样技术与宽带太赫兹偏振片相配合,实现了对太赫兹光场偏振态的测量并成功提取了钛宝石的琼斯矩阵。可以说这些工作对发展太赫兹偏振光谱技术、提取物质的各项异性特征都起到了重要的推动作用。然而,在这些传统技术中,对太赫兹偏振态的获取主要通过分别测量太赫兹水平和竖直电场分量实现,因此通常需要对太赫兹系统进行精密的调节。例如,采用四电极光导天线技术时,需要保证太赫兹焦斑与探测光同时准确聚焦于光导天线的中心;采用改进的电光采样技术时,需要不断调整探测晶体的晶向角度或调整探测光的偏振态,以便于对不同的太赫兹偏振分量进行响应。这些操作有可能对太赫兹偏振态的测量引入误差,进而影响琼斯矩阵提取的准确性。

本文提出了一种新颖的检测手段,可以对物质在太赫兹波段的琼斯矩阵进行准确测定。所提方法利用太赫兹面阵成像系统相干测量了会聚太赫兹光场的纵向分量 E_z ,并从中一次性地获取了太赫兹偏振信息。同时,通过对未放置样品、放置原始样品和样品旋转 90° 后的透射太赫兹光场偏振信息分别进行测定,对物质的琼斯矩阵元素进行了高精度提取。利用所提检测方法,在理论和实验上分别对不同角度下太赫兹偏振片和波片的琼斯矩阵进行提取并分析比较,以证明所提方法的实用性。

2 方法基本原理

2.1 琼斯矩阵的提取方法

在提取琼斯矩阵的元素时,首先认为入射光的琼斯矢量为 $\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$, A_1 和 B_1 分别代表入射光偏振在 X 和 Y 方向的投影,在经过样品后,由于认为样品的琼斯矩阵为 $\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}$,则出射光的偏振态发生变化,琼斯矢量变为 $\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix}$,满足

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

进一步,认为入射光琼斯矢量仍为 $\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$,将样品旋转 90° ,出射光的琼斯矢量变为 $\begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$,满足

$$\begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & -\sin 90^\circ \\ \sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{21} \\ -J_{12} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$ 均为旋转矩阵^[23]; φ 为样品主轴与 X 轴之间的夹角。根据式(1)和式(2),有

$$\begin{cases} A_2 = J_{11}A_1 + J_{12}B_1 \\ B_2 = J_{21}A_1 + J_{22}B_1 \\ A_3 = J_{22}A_1 - J_{21}B_1 \\ B_3 = -J_{12}A_1 + J_{11}B_1 \end{cases}, \quad (3)$$

进而可推导出琼斯矩阵中的元素,

$$\begin{cases} J_{11} = \frac{A_2A_1 + B_1B_3}{A_1^2 + B_1^2} \\ J_{12} = \frac{A_2B_1 - B_3A_1}{A_1^2 + B_1^2} \\ J_{21} = \frac{B_2A_1 - A_3B_1}{A_1^2 + B_1^2} \\ J_{22} = \frac{B_2B_1 + A_3A_1}{A_1^2 + B_1^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式(4)是琼斯矩阵中 4 个元素的计算公式。可见,应用上述算法时,需要一组入射光以及样品旋转 90° 前后的两组出射光的偏振信息,便可将琼斯矩阵的元素提取出来。

2.2 基于太赫兹光场纵向分量的偏振信息提取方法

在测量太赫兹光场的琼斯矢量时,本课题组在 2018 年提出了利用太赫兹面阵成像系统测量并分析会聚太赫兹光场的纵向分量 E_z ,进而提取太赫兹偏振信息的方法^[24]。这里,对此方法的数据处理过程进行改进,提高了此方法的准确性和实用性。如图 1 所示,太赫兹波首先通过太赫兹偏振片(TP),确保其入射样品时为 X 线偏振。为了产生较强的纵向场分量,采用高阻硅透镜(Si lens)对太赫兹光束进行聚焦。在硅透镜焦平面附近放置 $\langle 100 \rangle$ ZnTe 晶体,用于相干测量会聚太赫兹波的 E_z 分量^[24]。采用分束器(BS)实现探测光与太赫兹波的重合,利用动态相减技术^[25]和电光差分检测技术^[26]提取 E_z 的复场分布。

为了说明所提方法是如何通过 E_z 分量提取太赫兹偏振信息的,这里首先通过数值模拟描述如何生成一个具有任意偏振态的太赫兹光场纵向分量 E_z 。根据 Richards-Wolf 衍射积分算法^[27],可以模拟 X 线偏振太赫兹波会聚后的纵向场 E_{xz} 分量,在焦平面附近 E_{xz} 可表示为

$$E_{xz}(\rho, \phi, z) = -2A \cos \phi \int_0^\alpha \sqrt{\cos \theta} \sin^2 \theta \times J_1(k\rho \sin \theta) \exp(jkz \cos \theta) d\theta, \quad (5)$$

式中: A 是比例常数,一般可以认为 $A = 1$; (ρ, ϕ, z) 是观测平面上的圆柱坐标系; $J_1(k\rho \sin \theta)$ 是一阶贝塞尔函数; k 是真空中波数,可以表示为 $k = 2\pi\nu/c$, ν 为入射太赫兹波的频率, c 为真空光速; θ 是会聚太赫兹光束与光轴之间的夹角, α 是 θ 的最大值。下一步,对计

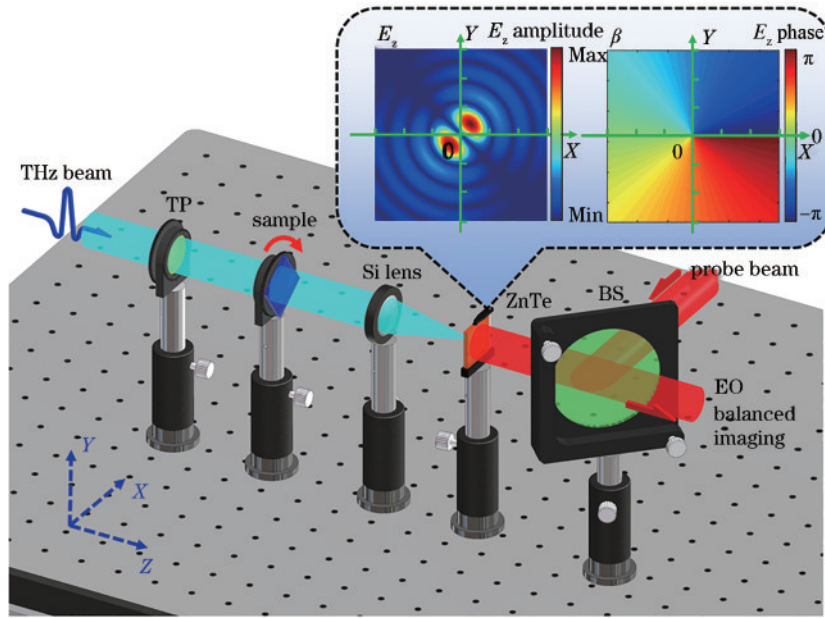


图 1 基于会聚太赫兹光场纵向场分量的偏振检测系统

Fig. 1 Schematic of the polarization detection system based on the longitudinal field component of a converging terahertz (THz) field

算得到的 E_{xz} 在 X - Y 平面进行 90° 旋转, 就得到了 Y 线偏振太赫兹波会聚后的纵向场分量 E_{zy} 。此时, 具有任意偏振态的太赫兹光场的纵向场分量 E_z 可以表示为 $a \times E_{xz} + b \times E_{zy}$, 其中 $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ 为太赫兹光场的琼斯矢量。

图 1 插图的左图给出了 $a = \sqrt{2}/2$ 、 $b = \sqrt{2}/2$ 、 $v = 0.4$ THz、 $\alpha = 22^\circ$ 、 $z = 0$ mm 时的振幅分布, 也就是 45° 线偏振下太赫兹光场的 E_z 振幅分布。

现在可以认为已经获得了任意偏振态下太赫兹纵向场 E_z 的复振幅分布。在基于 E_z 进行偏振信息提取时, 对 E_z 图像上每一个像素点的复振幅分布都沿 X 轴进行投影并进行相干求和, 则得到了入射太赫兹光场在 X 方向的偏振信息。同理, 将 E_z 图像上的像素点向 Y 轴进行投影并相干求和, 则得到了 Y 方向的偏振信息。提取到的琼斯矢量 $\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix}$ 可以表示为

$$\begin{cases} E_a = \sum_{x,y} E_z(x,y) \cdot \cos[\beta(x,y)] \\ E_b = \sum_{x,y} E_z(x,y) \cdot \sin[\beta(x,y)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中: β 为 E_z 的方位角, 如图 1 插图的右图所示。相比传统的太赫兹偏振测量方法^[17-19], 所提方法的优势在于利用了 E_z 光场的不同空间分布来表征太赫兹入射光场的不同偏振分量, 由于 E_z 图像是一次性获得的, 因此可以一次性地获取入射太赫兹光场的全部偏振信息, 减小了多次测量引入的误差。同时, 在对 E_z 图像进行数据处理时, 利用文献^[24]中的方法在 E_z 图像中光强最大处选定初始位置并沿着角向方向提取数据, 通过振幅和相位曲线的变化来确定太赫兹偏振态。此方法的问题是, 没有将全部成像数据都利用起来, 当太

赫兹光场较弱, 或数据采集点的位置选取不合适时, 有可能影响对太赫兹偏振态的提取精度。这里, 采用所提数据处理方法, 该方法可以将全部图像数据都利用起来进行偏振信息提取, 最大程度地降低了在图像测量时的噪声引入或数据处理时的人为因素所带来的影响。

3 模拟结果

3.1 太赫兹光场偏振态测量的模拟结果

首先在模拟上验证对太赫兹光场偏振态进行测量是可行的。图 2 展示了太赫兹光束通过偏振片和波片后的 E_z 仿真结果, 以及从中提取的 X 、 Y 偏振分量的振幅比 $|E_b|/|E_a|$ 和相位差 $\Phi_a - \Phi_b$ 。图 2(a) 展示了 X 线偏振太赫兹波通过 45° 偏振片后的偏振信息提取结果。预设的琼斯矢量可以写为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

图 2(a) 首先给出了在 0.55, 0.75, 0.95 THz 处 E_z 的振幅和相位图像。每一幅振幅图像都对自身进行了强度归一化, 每一幅相位图像的取值范围都设置在 $-\pi$ 到 π 之间。模拟中, 太赫兹光束最大会聚角度 $\alpha = 22^\circ$, 同时考虑到在实验测量中观测面与焦平面之间难免存在偏差, 模拟中将观测面的位置偏离焦平面 $z = 0.2$ mm。可以看出, E_z 振幅均呈现双旁瓣分布, 并以 135° 对角线为轴左右对称。 E_z 相位呈现了以 135° 对角线为轴的半环嵌套分布, 并且在左右相互对应区域存在 π 的相位差。造成这些现象的原因是: 当 X 线偏振太赫兹波通过 45° 偏振片后成为 45° 线偏振态, 并且

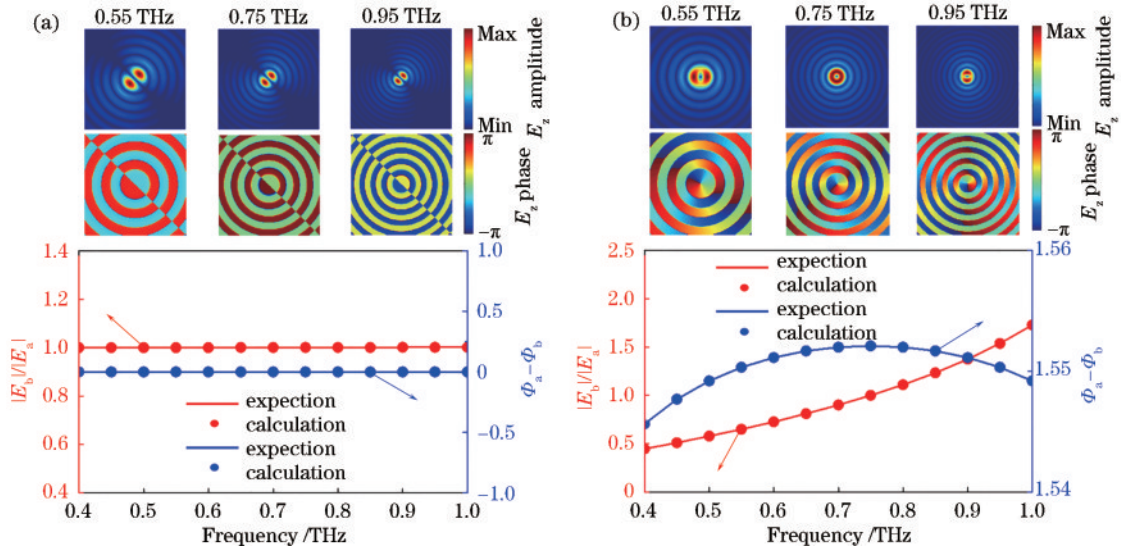


图 2 太赫兹光束通过偏振片和波片后的偏振态提取模拟结果。(a) X线偏振太赫兹光束通过 45° 偏振片后的偏振信息提取结果；(b) X线偏振太赫兹光束通过 1/4 波片后的偏振信息提取结果

Fig. 2 Simulated results for extracting the polarizations of THz beams after passing through a polarizer and wave plate. (a) Simulated results for extracting the polarization of X-linearly polarized THz beams after passing through a polarizer with a 45° orientation; (b) simulated results for extracting the polarization of X-linearly polarized THz beams after passing through a 1/4 wave plate

在太赫兹波聚焦后,在 135° 对角线两侧的光束都向中心焦点会聚,这两部分光束的相位相差 π ,因此在焦点处相干相消,形成了这样的光场分布模式,这与之前的报道是一致的^[28]。利用上述的偏振提取算法,根据模拟的不同频率下 E_z 复振幅分布,得到了太赫兹光场两个偏振分量的振幅比 $|E_b|/|E_a|$ 和相位差 $\Phi_a - \Phi_b$,如图 2(a) 所示。其中实线表示理论预设值,圆点表示从 E_z 图像中提取出来的结果。可以看出,由于偏振片的调制特性是不随频率变化的,并且是 45° 放置,所以 $|E_b|/|E_a|$ 的比值一直为 1,相位差 $\Phi_a - \Phi_b$ 一直为 0,太赫兹偏振信息的提取结果与预设结果完全一致。

为了进一步验证此太赫兹光场偏振测量方法的可行性,对 X 线偏振太赫兹波通过 1/4 波片后的偏振信息进行提取。1/4 波片的中心频率预设 0.75 THz,认为波片光轴与 X 轴夹角为 45°,琼斯矢量可以写为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 & 0 \\ 0 & t_2 \exp\left(j \frac{2\pi\nu}{c} \Delta nd\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left[t_1 + t_2 \exp\left(j \frac{2\pi\nu \Delta n}{c} d\right) \right] \\ \frac{1}{2} \left[t_1 - t_2 \exp\left(j \frac{2\pi\nu \Delta n}{c} d\right) \right] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $t_1 = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2}$ 和 $t_2 = \frac{4n_0 n_2}{(n_0 + n_2)^2}$ 为波片对 X 和 Y 偏振分量的透过率; n_0 为空气折射率; n_1 和 n_2 分别为介质对 X 和 Y 偏振分量的折射率; d 为波片厚度,这里

忽略了波片对太赫兹光束的吸收。根据文献^[29],这里设定 $n_1 = 2.11$ 、 $n_2 = 2.16$ 、 $d = 2$ mm,以至于波片在 0.75 THz 处可以对 X 与 Y 偏振分量之间引入 $\pi/2$ 的相位差。图 2(b) 首先给出了透过波片后太赫兹光场在 0.55, 0.75, 0.95 THz 处的 E_z 振幅相位分布。可以看出由于在 0.75 THz 处太赫兹光场为圆偏振态,在 X、Y 分量上具有相同的强度,因此 E_z 振幅呈现了均匀光环的分布模式,并且由于 X、Y 分量上存在 $\pi/2$ 的相位差, E_z 相位呈现了涡旋的分布模式。在 0.55 THz 和 0.95 THz 处, E_z 相位仍然呈现了近似涡旋的分布模式,但是由于偏离了 0.75 THz, X、Y 分量上的强度不一致,因此 E_z 振幅呈现了非均匀光环分布,二者偏振态分别为长轴沿着 X 和 Y 方向的椭圆偏振。同样,利用上述的偏振提取算法,从 E_z 的复振幅分布中提取了不同频率下的振幅比 $|E_b|/|E_a|$ 和相位差 $\Phi_a - \Phi_b$,如图 2(b) 所示。可以看出:随着频率的升高, $|E_b|/|E_a|$ 单调上升,从 0.445 逐渐变为 1.729; $\Phi_a - \Phi_b$ 基本保持在 1.55 左右,在 0.75 THz 处达到最大值,即 $\pi/2$ 。太赫兹偏振信息的提取结果与预设结果仍是完全一致的。两个模拟结果均表明可以利用 E_z 的复振幅对太赫兹光场的偏振态进行高精度提取。

3.2 琼斯矩阵提取的模拟结果

在获得了太赫兹光场的偏振信息后,便可以利用 2.1 节描述的算法提取样品琼斯矩阵中的各个元素,这里在模拟上对太赫兹波片尝试进行处理,验证对琼斯矩阵进行提取的有效性。如图 3(a) 所示, X 线偏振太赫兹光束照射样品,选定中心频率为 0.75 THz 的太赫兹 1/4 波片,其透过率、双折射和样品厚度的值与

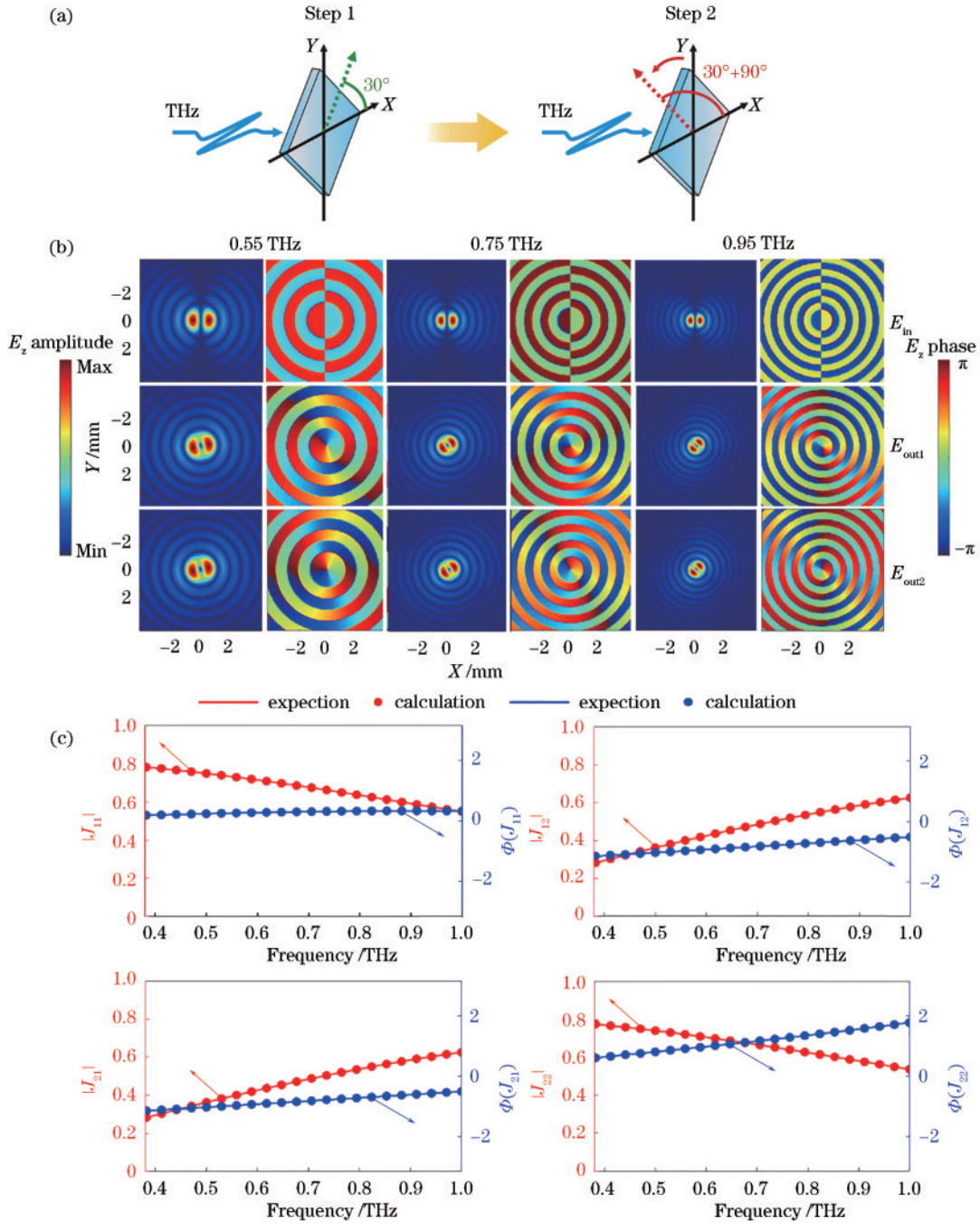


图3 对太赫兹波片琼斯矩阵的模拟结果。(a)模拟过程示意图;(b)入射和两次出射太赫兹光场在0.55,0.75,0.95 THz处 E_z 的振幅相位分布;(c)4个琼斯矩阵元素随频率变化的曲线

Fig. 3 Simulated results for Jones matrix of a THz wave plate. (a) Schematic of the simulation process; (b) amplitude and phase distributions of E_z at 0.55, 0.75, 0.95 THz for incident and two transmitted THz fields; (c) curves of four Jones matrix elements as functions of the frequency

3.1节描述一致。这里,认为样品的主轴与X方向相差 30° ,因此两个旋转矩阵角度设定为 30° ,则样品的琼斯矩阵可以表述为

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ \\ \sin 30^\circ & \cos 30^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 & 0 \\ 0 & t_2 \exp\left(j\frac{2\pi\nu}{c}\Delta nd\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 30^\circ & \sin 30^\circ \\ -\sin 30^\circ & \cos 30^\circ \end{bmatrix} \quad (9)$$

在进行第一次测量之后,获取太赫兹光场的 E_z 分量并进行偏振信息的提取。此时,将样品旋转 90° ,也就是将两个旋转矩阵角度设定为 120° ,再进行第二次测量并获取太赫兹光场的偏振信息。图3(b)展示了0.55,0.75,0.95 THz处入射(E_{in})和两次出射(E_{out1} 和 E_{out2})太赫兹光场 E_z 分量的振幅相位分布。可以看出,入射光场呈现了典型的左右对称双旁瓣模式^[24],两个出射光场由于不是完美的圆偏振,所以振幅均呈现了

非均匀光环分布,同时相位呈现了近似涡旋的分布模式。根据所得到的 E_z 分布,提取入射和两次出射太赫兹光场的琼斯矢量 $\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$,进而可以通过式(4)计算出当样品主轴与 X 方向相差 30° 时样品的琼斯矩阵元素。由于波片对太赫兹光场的影响既有振幅调制又有相位调制,因此样品琼斯矩阵元素 J_{11} 、 J_{12} 、 J_{21} 和 J_{22} 均为复数,图 3(c)展示了 4 个元素的振幅和相位随频率变化的光谱曲线。模拟结果显示: J_{11} 和 J_{22} 的振幅调制都是单调递减的, J_{12} 和 J_{21} 的振幅调制都是单调递增的;同时, J_{12} 、 J_{21} 和 J_{22} 的相位调制都是单调递增的, J_{11} 的变化较为平缓, J_{11} 和 J_{22} 的相位调制均为正, J_{12} 和 J_{21} 的相位调制均为负。可以看出,根据式(4)计算得出的琼斯矩阵元素曲线与预设曲线完全重合,证明了所提检测方法的可行性。

3 实验结果与讨论

在实验中,应用太赫兹面阵成像系统对所提样品琼斯矩阵检测方法进行验证,实验系统的光路如图 4(a)所示。系统采用的光源为 Spectra-Physics 飞秒再生放大器,中心波长为 800 nm,脉宽为 50 fs,功率为 800 mW,重复频率为 1 kHz。利用 1/2 波片(HWP)和偏振分束器(PBS)将入射激光分为两束,包括泵浦路(pump beam)和探测路(probe beam),分别用来产生和探测太赫兹脉冲。泵浦路激光在经过电动平移台(stage)后,通过凹透镜(L1)进行扩束,并照射到 1 mm 厚的 $\langle 110 \rangle$ ZnTe 晶体上,通过光整流效应辐射太赫兹脉冲^[30]。利用离轴抛物面反射镜(PM)对太赫兹光束进行准直,太赫兹光束的直径约为 16 mm。选用太赫兹偏振片(P)确保入射样品的太赫兹光束是 X 线偏振态的,此时太赫兹光束经过样品(sample)调制后,其偏振态发生改变。为产生足够的 E_z 分量,利用焦距为 20 mm 的高阻硅透镜(SL)对太赫兹光束进行聚焦,会聚后的太赫兹光束照射到探测晶体,探测晶体为 1 mm 厚的 $\langle 100 \rangle$ ZnTe。在探测路中,激光首先经透镜组(L2、L3)进行扩束和准直,经过分束镜(BS)反射后,探测光束照射到探测晶体内部,由探测晶体左侧表面反射,反射光与太赫兹光束重合,太赫兹信息通过线性电光效应加载到探测光的偏振态上^[31]。携带太赫兹信息的探测光经过透镜组(L4、L5)投影到 CCD 摄像头上,透镜组的放大率约为 0.36,经 1/4 波片(QWP)和 Wollaston 棱镜(PBS)分解为具有水平和竖直偏振的两束光。将一个机械斩波器插入泵浦光路,调制太赫兹脉冲的输出频率,利用动态相减技术和差分探测技术从探测光中提取太赫兹信息^[25-26]。所采用的 CCD 摄像头由重庆创宇光电子技术有限公司制造,型号为 CY-DB1300A,像素数目为 1300×1030 ,为了减少数据处理量和提高单像素的信噪比,进行 2×2 的像素合并,同时只截取了探测光的曝光区域,最终获得的太赫

兹图像的像素数目为 300×300 。在实验中,以 $20 \mu\text{m}$ 为步长连续调整电动平移台位置,改变泵浦路与探测路之间的光程差,对太赫兹时域图像进行时间分辨测量,每次测量所选用的时间窗口约为 6.7 ps。在每一个扫描点上,为保证足够的信噪比,均测量 50 幅图像进行平均。在每个像素点上可以得到一个太赫兹时域信号,对其进行傅里叶变换,可以得到一系列不同频率的太赫兹频域图像。在实验上测量的第一组样品是方向与 X 轴成 45° 和 30° 的太赫兹偏振片。太赫兹偏振片为俄罗斯 TYDEX 公司制作的铝质金属线栅偏振片,其基质为聚乙烯薄膜,在 0.3~3 THz 频率范围可实现偏振度大于 98 的太赫兹线偏振光(偏振度定位为 $(E_x - E_y)/(E_x + E_y)$, E_x 、 E_y 为透过偏振片后太赫兹光场的 X、Y 分量)。首先对未放置样品的太赫兹光场分量 E_z 进行测量,再放入样品,调整其透光方向与 X 轴分别成 45° 和 135° ,测量两次出射太赫兹光场的 E_z 分量。图 4(b)展示了 0.55、0.75、0.95 THz 处 E_z 的振幅和相位分布。可以看出,由于太赫兹偏振片具有宽带特性,各个频率成分除了太赫兹焦斑大小不同外,振幅都沿相应的对角线呈双旁瓣分布,并且左右对应的相位都相差 π 。这里,为了证明 2.2 节所提出的数据处理方法相比文献[24]中的方法可以更好地提取太赫兹光场偏振信息,利用两种方法对成像结果进行处理,得到了相应的振幅比 $|E_b|/|E_a|$ 和相位差 $\Phi_a - \Phi_b$,并与预设结果进行了比较。图 4(c)为从太赫兹入射光场 E_z 和经 45° 、 135° 偏振片后太赫兹光场 E_z 提取到的振幅比曲线,可以看出所提方法得到的实验结果与预设结果基本一致,最大偏差仅为 1.5%,而利用之前方法得到的结果存在一定的偏差,特别在高频波段,由于太赫兹光场强度变弱,偏差较为明显,最大偏差达 9.8%。图 4(d)为相应的相位差曲线,可以明显看出所提方法得到的结果比其他方法更符合预设结果。所提方法得到的结果与预设结果的最大偏差仅为 1.8%,文献[24]中的方法得到的结果与预设结果的最大偏差达 10%,这是因为提取相位时对成像系统的测量误差或引入的噪声更为敏感。由此可见,相对于文献[24]数据处理方法,所提方法提取太赫兹光场偏振态时具有更高的准确性和实用性。

利用偏振信息提取方法和琼斯矩阵计算方法对样品的琼斯矩阵元素进行提取,结果如图 5(a)所示。可以看出,由于偏振片对太赫兹光场仅是振幅调制,并且对各个频率分量的调制度是一样的,因此 4 个琼斯矩阵元素的振幅随频率的变化均基本不变,并且相位调制均为 0。为了比较,图 5(a)也展示了理论预设的结果,可以看出实验与理论结果可以很好地对应起来,表明了所提检测方法的可行性。此外,在此实验中还测量了当偏振片方向与 X 轴成 30° 时样品的琼斯矩阵,采用相同的操作步骤,将样品角度分别调整为 30° 和

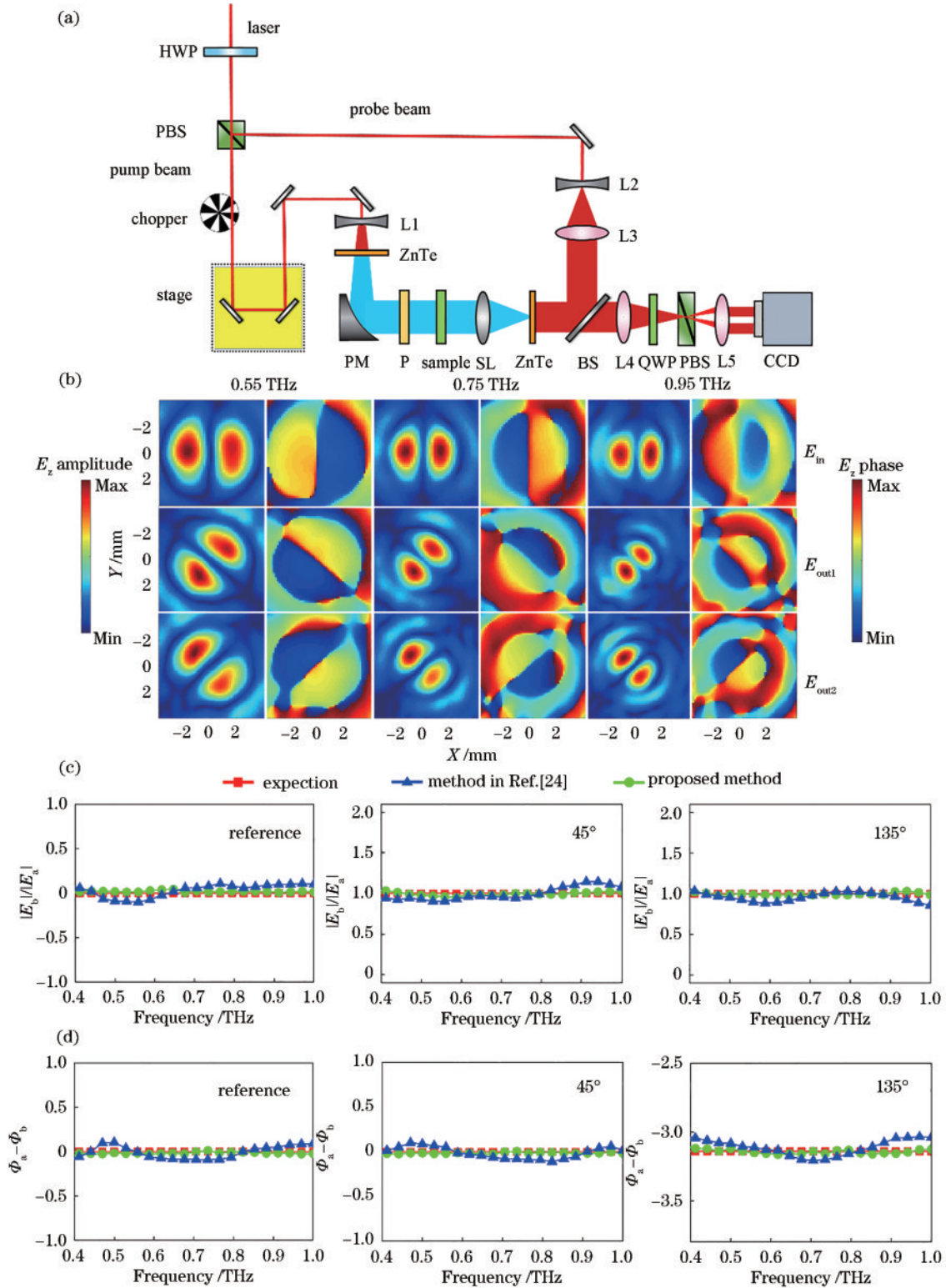


图 4 实验系统及对太赫兹偏振片的测量结果。(a)利用太赫兹面阵成像系统测量太赫兹光场 E_z 分量的示意图;(b)在 0.55,0.75, 0.95 THz 处 E_z 的振幅相位分布;(c)从太赫兹入射光场 E_z 和通过 45° 、 135° 偏振片后太赫兹光场 E_z 提取到的振幅比 $|E_b|/|E_a|$;(d)相应的相位差 $\Phi_a - \Phi_b$

Fig. 4 Experimental system and measurement for the THz polarizers. (a) Schematic of a THz focal-plane imaging system for measuring the E_z component of a THz field; (b) amplitude and phase distributions of the E_z component at 0.55, 0.75, 0.95 THz; (c) $|E_b|/|E_a|$ extracted from E_z components of the incident THz field and the transmitted THz fields through 45° and 135° polarizers; (d) corresponding $\Phi_a - \Phi_b$

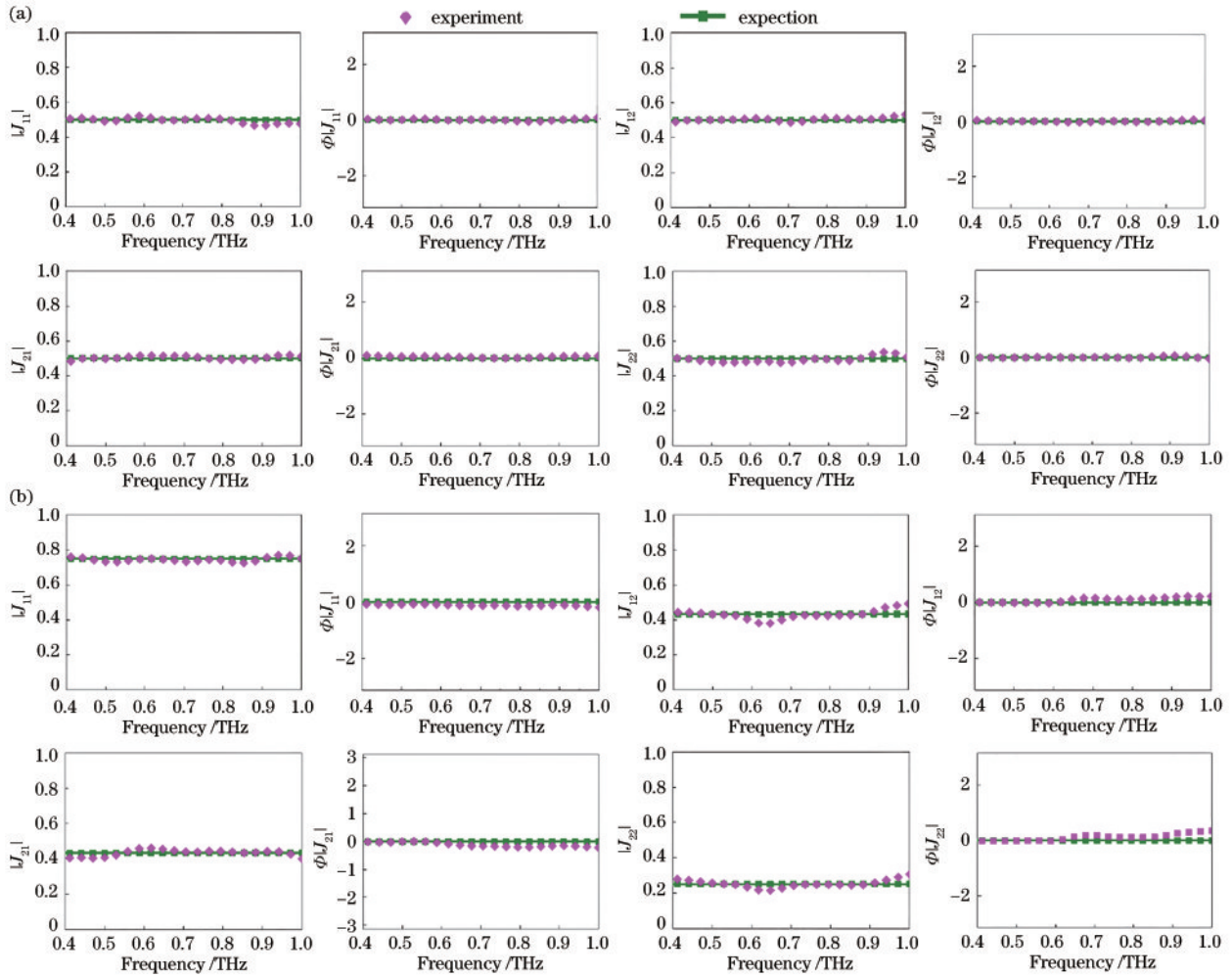


图5 太赫兹偏振片的琼斯矩阵测量结果。(a)太赫兹45°偏振片的琼斯矩阵各个元素随频率变化的振幅和相位曲线;(b)太赫兹30°偏振片的琼斯矩阵各个元素随频率变化的振幅和相位曲线

Fig. 5 Experimental results of Jones matrix elements for THz polarizers. (a) Amplitude and phase curves of the Jones matrix elements of a THz polarizer with 45° orientation as function of the frequency; (b) amplitude and phase curves of the Jones matrix elements of a THz polarizer with 30° orientation as function of the frequency

120°,测量了入射和两次出射太赫兹光场的 E_z 分量。图 5(b)展示了对样品琼斯矩阵元素的提取结果和理论预设结果,二者仍然显示了很好的一致性。同时,通过比较实验与理论结果发现,对于太赫兹偏振片的琼斯矩阵测量,各个矩阵元素在不同频率下的振幅和相位的测量误差均不大,都可以控制在约 2% 附近。

为了明确所提检测方法的测量精度,将太赫兹偏振片的透光方向从 35° 逐渐调整至 55°,步长为 1°,并提取了在每一个角度下的琼斯矩阵元素。图 6 展示了 4 个元素在 0.75 THz 处的振幅随着偏振片角度的变化趋势。可以看出 J_{11} 和 J_{22} 分别呈现了明显的单调递减和递增趋势, J_{12} 和 J_{21} 呈现了较为平缓的变化趋势。从 J_{11} 和 J_{22} 随角度的演变可以看出所提检测方法对样品琼斯矩阵的改变具有较为灵敏的响应,检测精度可以基本达 1°。另外,图 6 也展示了 4 个元素的理论预设结果,可以看出实验和理论结果是非常吻合的。

还对中心频率为 0.75 THz 的太赫兹波片进行了琼斯矩阵的测量。在实验中,波片的主轴与 X 方向夹

角选定为 30°,利用所提检测方法测量琼斯矩阵。实验结果如图 7(a)所示,样品的 4 个琼斯矩阵元素随频率的振幅相位调制曲线显示了与图 3(c)一致的规律。这里,理论预设结果也被放在图 7(a)中与实验结果进行比较,可以看出二者的演变基本一致。应该指出,实验与理论结果之间还是存在一些差异,并且集中出现在高频波段。琼斯矩阵元素的振幅和相位结果表现为:在 0.4~0.7 THz 范围内测量误差相对较小,约在 4% 以内;而在高频波段 0.7~1 THz 范围内测量误差较明显,约为 7%。这主要是因为太赫兹成像系统中无法使用锁相技术,所测量的太赫兹图像信息受噪声的影响比较明显,并且越在高频波段太赫兹辐射强度就越弱,太赫兹光场的相位变化也越灵敏,因此所提取的太赫兹振幅与相位信息可能就存在较大误差,因此实验结果与理论结果有一定的偏差。这一问题可以利用更高效的太赫兹辐射源来解决。例如采用 LiNbO_3 ^[32]、DAST^[33] 等具有更高非线性系数的晶体来产生更强的太赫兹辐射^[34-35],可以很大程度改进成像

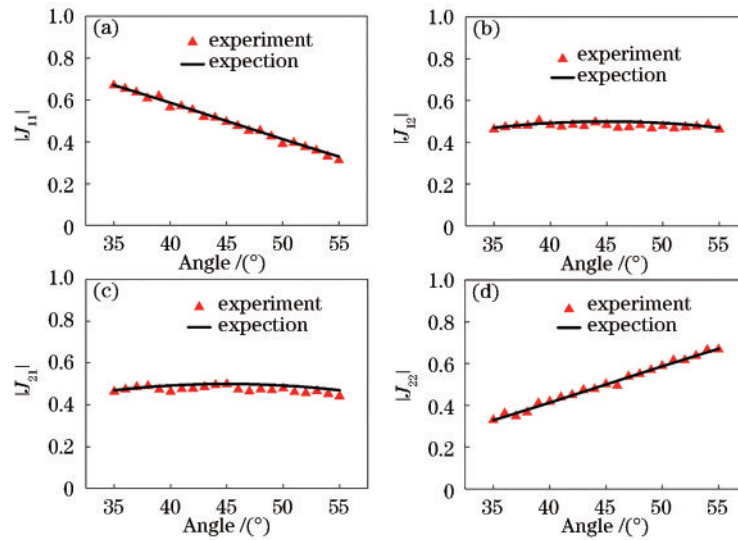


图 6 琼斯矩阵检测方法灵敏度的测试。(a)~(d) J_{11} 、 J_{12} 、 J_{21} 和 J_{22} 的振幅在 0.75 THz 处的变化

Fig. 6 Sensitivity testing of the Jones matrix measurement method. (a)~(d) Amplitude of J_{11} , J_{12} , J_{21} , and J_{22} at 0.75 THz

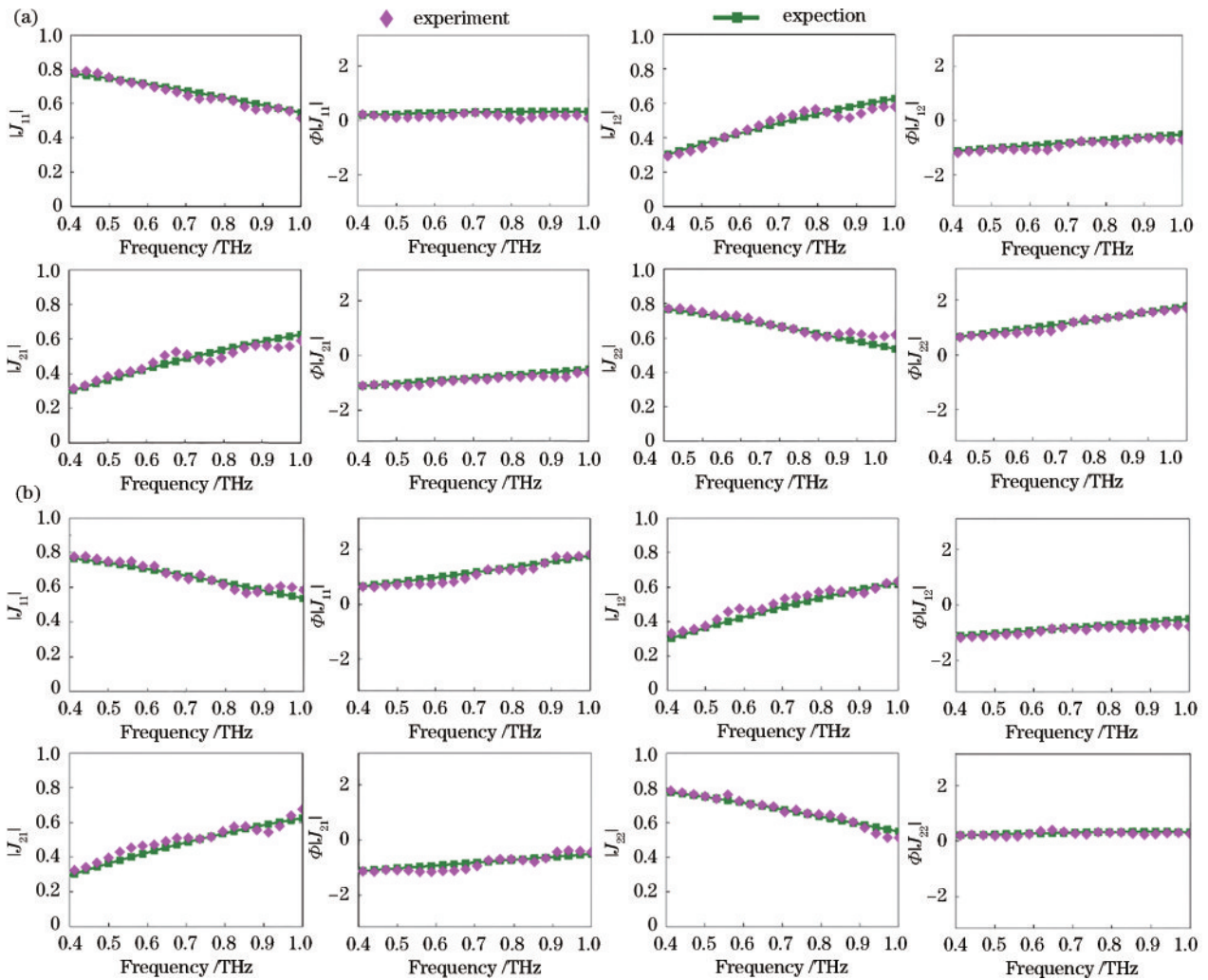


图 7 太赫兹波片的琼斯矩阵测量结果。(a) 波片角度为 30° 时琼斯矩阵元素的振幅和相位随频率变化的曲线；(b) 波片角度为 60° 时琼斯矩阵元素的振幅和相位随频率变化的曲线

Fig. 7 Measurement for the Jones matrix of THz wave plates. (a) Amplitude and phase curves of the Jones matrix elements of the wave plate with 30° orientation as function of the frequency; (b) amplitude and phase curves of the Jones matrix elements of the wave plate with 60° orientation as function of the frequency

系统的信噪比,提高对样品琼斯矩阵提取的精度。在此实验中,还尝试将波片的主轴与 X 方向夹角选定为 60° ,利用所提检测方法测量琼斯矩阵。图 7(b)展示了实验测量结果和理论预设结果,可以看出除了受噪声一些细微影响,二者随频率的演变趋势是基本一致的,也进一步验证了所提检测方法的可靠性。

4 结 论

提出了一种基于会聚太赫兹光场纵向分量 E_z 提取物质琼斯矩阵的方法。利用太赫兹面阵成像系统相干测量会聚太赫兹光场的 E_z 分量,从中提取太赫兹光场的偏振信息,并通过改进数据处理方法提高对太赫兹偏振信息的提取精度。同时,通过分别对太赫兹光场在未放置样品、放置原始样品和样品旋转 90° 后的偏振态进行测量,进而提取样品的琼斯矩阵元素信息。利用所提检测技术,分别对不同角度的太赫兹偏振片和波片进行了琼斯矩阵测量,发现测量结果可以与理论预设结果达到很好的一致性,同时在实验上也证明了所提检测技术具有较高的测量精度。由于通过测量 E_z 分量,可以一次性获取太赫兹光场的偏振信息,因此所提技术可以对物质的琼斯矩阵进行高效、快速、简单的高精度获取。本工作为测定物质的各向异性特征提供了一种有效的技术手段,推动了太赫兹偏振光谱技术的发展。

参 考 文 献

- [1] Nagashima T, Tani M, Hangyo M. Polarization-sensitive THz-TDS and its application to anisotropy sensing[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(11): 740-775.
- [2] 孙一健, 王继芬. 太赫兹时域光谱技术在食品、药品和环境领域中的应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1600003.
Sun Y J, Wang J F. Research progress of terahertz time-domain spectroscopy in food, drugs, and environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1600003.
- [3] Ren L, Pint C L, Booshehri L G, et al. Carbon nanotube terahertz polarizer[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(7): 2610-2613.
- [4] Hsieh C F, Pan R P, Tang T T, et al. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1112-1114.
- [5] Kim Y, Yi M, Kim B G, et al. Investigation of THz birefringence measurement and calculation in Al_2O_3 and $LiNbO_3$ [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2906-2910.
- [6] Masson J B, Gallot G. Terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 265-267.
- [7] Aschaffenburg D J, Williams M R C, Talbayev D, et al. Efficient measurement of broadband terahertz optical activity[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(24): 241114.
- [8] Singh R, Plum E, Zhang W L, et al. Highly tunable optical activity in planar achiral terahertz metamaterials[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13425-13430.
- [9] Zhou J F, Chowdhury D R, Zhao R K, et al. Terahertz chiral metamaterials with giant and dynamically tunable optical activity[J]. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 2012, 86(3): 035448.
- [10] 杨森, 袁苏, 王佳云. 一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0216001.
Yang S, Yuan S, Wang J Y. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0216001.
- [11] Shuvaev A M, Astakhov G V, Pimenov A, et al. Giant magneto-optical faraday effect in HgTe thin films in the terahertz spectral range[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 107404.
- [12] Acbas G, Niessen K A, Snell E H, et al. Optical measurements of long-range protein vibrations[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-7.
- [13] Niessen K A, Xu M Y, George D K, et al. Protein and RNA dynamical fingerprinting[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-10.
- [14] Okano M, Fujii M, Watanabe S. Anisotropic percolation conduction in elastomer-carbon black composites investigated by polarization-sensitive terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(22): 221902.
- [15] Okano M, Watanabe S. Anisotropic optical response of optically opaque elastomers with conductive fillers as revealed by terahertz polarization spectroscopy[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-11.
- [16] Rutz F, Hasek T, Koch M, et al. Terahertz birefringence of liquid crystal polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(22): 221911.
- [17] Vieweg N, Fischer B M, Reuter M, et al. Ultrabroadband terahertz spectroscopy of a liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28249-28256.
- [18] 何思源, 周芷茵, 田小凡, 等. 不同入射角下物体的穆勒矩阵[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1726001.
He S Y, Zhou Z Y, Tian X F, et al. Investigating the Mueller matrix of objects at different incident angles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1726001.
- [19] Gerrard A, Burch J M. Introduction to matrix methods in optics[M]. New York: Dover, 1994.
- [20] Niehues G, Funkner S, Bulgarevich D S, et al. A matter of symmetry: terahertz polarization detection properties of a multi-contact photoconductive antenna evaluated by a response matrix analysis[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16184-16195.
- [21] Sanjuan F, Gaborit G, Coutaz J L. Full electro-optic terahertz time-domain spectrometer for polarimetric studies[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 6055-6060.
- [22] Zhao G Z, Savini G, Yu Y, et al. A dual-port THz Time Domain Spectroscopy System optimized for recovery of a sample's Jones matrix[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-9.
- [23] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 61-62.
Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press,

- 2003: 61-62.
- [24] Shang Y J, Wang X K, Sun W F, et al. Polarization determination based on the longitudinal field of a converging terahertz wave[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5508-5511.
- [25] Jiang Z P, Xu X G, Zhang X C. Improvement of terahertz imaging with a dynamic subtraction technique [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(17): 2982-2987.
- [26] Wang X K, Cui Y, Sun W F, et al. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(23): 4626-4632.
- [27] Boivin A, Wolf E. Electromagnetic field in the neighborhood of the focus of a coherent beam[J]. *Physical Review*, 1965, 138(6B): B1561.
- [28] Wang X K, Wang S, Xie Z W, et al. Full vector measurements of converging terahertz beams with linear, circular, and cylindrical vortex polarization[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24622-24634.
- [29] Takeya K, Ishizuki H, Taira T. Quantitative evaluation of birefringence of quartz crystal in terahertz region[C]// *Advanced Solid State Lasers 2020*, October 13-16, 2020, Washington, D.C., United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: JTh6A.20.
- [30] Löffler T, Hahn T, Thomson M, et al. Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters[J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5353-5362.
- [31] Wu Q, Hewitt T D, Zhang X C. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(8): 1026-1028.
- [32] 吴晓君, 任泽君, 孔德胤, 等. 铌酸锂强场太赫兹光源及其应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1914001.
Wu X J, Ren Z J, Kong D Y, et al. Lithium niobate strong-field terahertz source and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1914001.
- [33] Vicario C, Monoszlai B, Hauri C P. GV/m single-cycle terahertz fields from a laser-driven large-size partitioned organic crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(21): 213901.
- [34] 王依海, 龙娟, 刘呈普, 等. 静电场调制飞秒激光气体微等离子体的太赫兹辐射增强[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1114001.
Wang Y H, Long J, Liu C P, et al. Terahertz radiation enhancement from femtosecond laser ionized gas micro-plasma under static electric field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1114001.
- [35] 韩张华, 孙开礼, 蔡阳健. 微纳光学结构与太赫兹辐射产生技术的研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823017.
Han Z H, Sun K L, Cai Y J. Research progress of micro-nano optical structure and terahertz radiation generation technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823017.