

太赫兹数字全息术的研发与应用

郑显华 王新柯 孙文峰 冯胜飞 叶佳声 张岩

(首都师范大学物理系, 北京 100048)

摘要 随着太赫兹技术的逐渐成熟,太赫兹数字全息术作为其中重要的发展方向之一,已经逐渐在众多科研和工业领域显示了强大的应用实力。近些年太赫兹全息术取得了长足的进展,包括系统的开发和应用。建立了一套具有高分辨率、高信噪比、偏振测量能力的太赫兹全息成像系统。同时,将此系统应用到了对平板太赫兹元件的性能表征,对太赫兹波导进行模式测量,对会聚太赫兹波产生的 Gouy 相移进行观测。这些工作对最终将太赫兹数字全息术用于实际具有积极的推动作用。

关键词 成像系统;太赫兹数字全息;平板器件;波导;Gouy 相移

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209003

Developments and Applications of the Terahertz Digital Holography

Zheng Xianhua Wang Xinke Sun Wenfeng Feng Shengfei Ye Jiasheng Zhang Yan

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

Abstract With the maturation of terahertz (THz) technology, the THz digital holography, which is one of the most important development directions, gradually exhibits the application powers in various research and industrial fields. The work in the improvement and applications of the THz digital holography in recent years is discussed. A THz holographic imaging system with a high spatial resolution, high signal to noise ratio, and polarization information measurement ability is built. Furthermore, it is demonstrated that this imaging system can be used to check the performances of THz planar elements, measure transmission modes of the THz waveguide, and observe the Gouy phase shift of the converging THz beam. This work is valuable for promoting the practicability of the THz digital holography.

Key words imaging systems; terahertz digital holography; planar elements; waveguide; Gouy phase shift

OCIS codes 110.6795; 230.7390; 050.5080

1 引言

作为人类最后一个尚未完全开发的电磁波段,太赫兹(THz)射线从诞生之日起就已经引起了光学领域的广泛关注,较低的单光子能量和较好的透射特性使其在众多科研和工业领域都具有极强的应用价值。随着对太赫兹波段研究的不断深入,高功率的太赫兹光源^[1]和稳定的太赫兹脉冲探测手段日益成熟^[2-3],各种太赫兹光谱和成像技术已经逐步成为了实用的光学测量手段^[4-11]。在众多太赫兹技

术之中,太赫兹数字全息术算得上最引人注目的,它将太赫兹成像测量与光谱分析结合在一起,使人们可以准确获得二维太赫兹电场的全部信息。

最初的太赫兹数字全息术是美国华裔科学家 Zhang 的课题组在 1996 年提出的^[2,12],利用扩展的太赫兹光源和探测光束共同照射电光晶体,通过电光采样法将太赫兹波前信息加载到探测光的偏振态上,并利用电荷耦合器件(CCD)摄像头进行提取。由于此技术可以极大地提高太赫兹系统信息获取的能力,一

收稿日期: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(11204188, 61205097, 91233202, 11374216, 11174211)、国家 973 计划(2013CBA01702)、国家 863 计划(2012AA101608-6)、北京市自然科学基金(KZ201110028035, 1132011)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-12-0607)

作者简介: 郑显华(1981—),女,硕士研究生,讲师,主要从事微纳光学器件设计方面的研究。

E-mail: zhengxianhuazz@163.com

导师简介: 张岩(1971—),男,博士,教授,主要从事太赫兹波谱与成像、微纳光学器件设计、光学数字全息等方面的研究。E-mail: yzhang@mail.cnu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号: s042011436s)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

经提出就立刻成为了本领域的研究热点。在 2005 年, Usami 等^[13]利用此技术对不同化学物质进行了成像识别, 通过获取的光谱信息对物质成分进行了鉴定。在 2007 年, Yasuda 等^[14]利用此技术实现了对运动物体的观测, 成功记录了水滴下落的过程。随着太赫兹数字全息术的持续发展, 其测量精度不断提高, 应用领域也不断扩展。首都师范大学物理系科研团队自 2007 年开始研究太赫兹脉冲焦平面数字全息术, 至今已经开发出了具有高分辨率、高信噪比和偏振测量功能的太赫兹全息成像系统, 可以实现对二维太赫兹电场的强度、相位、偏振态和频域光谱的精确测量, 真正实现光学信息的全部获取^[15-18]。

本文综述了近年来本课题组在太赫兹脉冲焦平面数字全息术方面的部分研究成果, 包括对提升太赫兹全息成像系统测量精度所做的多方面改进, 以及将此成像技术应用到不同科研领域的研究工作。同时, 也对太赫兹脉冲焦平面数字全息术的发展进行了评论。

2 太赫兹脉冲焦平面数字全息术的发展

2.1 太赫兹准近场成像

传统的太赫兹数字全息术由于受到波长 (0.03~3 mm) 的限制, 其成像分辨率只能达到几毫米, 这成为了限制其推广的一个主要因素。幸运的是, 利用近场探测手段可以有效地提高图像分辨率, 所以关于太赫兹近场成像系统的研发已经成为了本领域的研究热点。在 2009 年, 本团队搭建了一套太

赫兹准近场成像系统, 将太赫兹面阵成像与近场探测技术有机结合, 提高了成像分辨率, 增强了太赫兹全息成像系统的实用性。

图 1(a) 为太赫兹准近场成像系统的示意图^[16]。本系统采用的飞秒激光具有 800 nm 中心波长、900 mW 平均功率、100 fs 脉宽和 1 kHz 的重复频率。激光被分为抽运光和探测光, 分别用于产生和探测太赫兹脉冲。抽运光被聚焦并通过 BBO 晶体, 产生的倍频光和剩余的基频光共同电离空气, 形成空气等离子体。利用空气等离子体中产生的三阶非线性效应激发太赫兹辐射。太赫兹脉冲由镀金抛物面反射镜 (PM) 进行准直并照射样品。在探测光路中, 利用透镜组 (L2 和 L3) 将探测光扩束, 并通过偏振片确保其线偏振态。由 50/50 的分束镜 (BS) 将探测光反射到探测晶体 (110) ZnTe 上。探测晶体的右侧表面被镀了增透膜, 可以确保探测光大部分能量进入探测晶体, 并由探测晶体的左侧表面反射回来。在探测晶体中, 太赫兹电场会调制探测晶体的折射率椭球, 进而改变探测光的偏振态, 由此将太赫兹电场的二维波前信息加载到探测光上。反射回来的探测光通过偏振片进行检偏, 并由 CCD 摄像头采集, 通过动态相减技术提取太赫兹信息。在此光路设计中, 样品可以直接靠近探测晶体放置, 进而对透射太赫兹电场的近场信息进行测量, 减少衍射影响, 以提高成像分辨率。

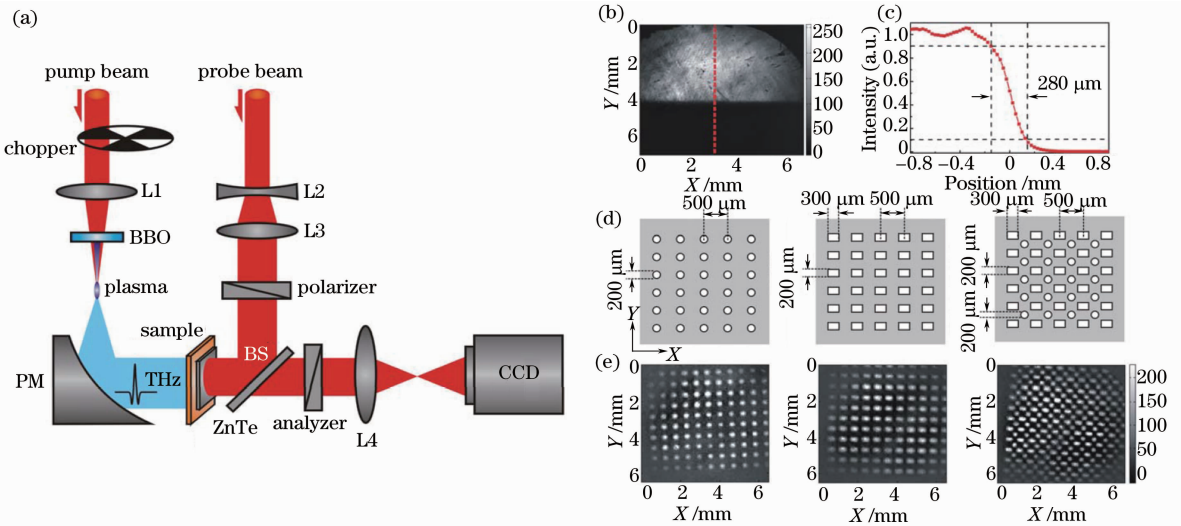


图 1 太赫兹准近场成像。(a) 太赫兹准近场成像系统; (b) 刀片边缘的太赫兹峰值强度图像; (c) 成像分辨率曲线; (d) 三种金属亚波长孔阵列样品的示意图; (e) 三种金属亚波长孔阵列样品的太赫兹峰值强度图像

Fig. 1 THz quasi-near-field imaging. (a) THz quasi-near-field imaging system; (b) THz peak image of a razor blade edge; (c) imaging resolution curve; (d) schematic maps of three metallic sub-wavelength hole arrays; (e) THz peak images of three metallic sub-wavelength hole arrays

利用刀片法测量了此系统的成像分辨率,利用厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 的钢制刀片作为样品,将其边缘靠近探测晶体放置,进行太赫兹成像测量。图 1(b)展示了刀片边缘的太赫兹峰值强度,图中的亮色和阴影区域分别对应着空气和刀片的部分。为了定量地分析成像分辨率,在图 1(b)中提取了位于红色虚线处的一系列数据,并将其归一化,如图 1(c)所示。在这一曲线上, $10\% \sim 90\%$ 的横向范围被作为判据来评估成像分辨率,可以看出分辨率达到了 $280\ \mu\text{m}$ 。因为本系统中所使用的太赫兹光源具有 $300\ \mu\text{m}$ 的中心波长,由此证明了这种测量方式可以完成亚波长成像。为了验证此系统对于微型光学结构的表征能力,选取了三种不同形状的金属孔阵列样品进行测量,分别为圆孔阵列、矩形孔阵列和圆孔矩形孔的组合阵列,如图 1(d)所示。其中圆孔的直径为 $200\ \mu\text{m}$,矩形孔的长宽分别为 $300\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$,孔阵列的周期为 $500\ \mu\text{m}$ 。三种样品都是由铝片制成,厚度均为 $50\ \mu\text{m}$ 。图 1(e)展示了三种样品的太赫兹峰值强度成像结果,从实验结果中可以清晰地分辨出每个样品的形态及不同样品之间的区别。由此证明了太赫兹准近场成像系统可以准确地呈现样品的细节信息,为太赫兹数字全息术的应用提供了很好的实验基础。

2.2 太赫兹差分成像

在传统的太赫兹全息面阵成像中,常采用偏振

片检偏的方法从探测光中提取太赫兹信息,如图 1(a)所示。这种方法的检偏精度不高,非常容易受激光器功率浮动的影响,降低了成像系统的信噪比。为了提高系统的测量精度,人们尝试了各种改进的太赫兹信息提取技术。在 2010 年,提出了一种太赫兹差分成像技术,将电光(EO)差分探测成功地应用到了太赫兹成像系统中,有效地提高了太赫兹成像系统的信噪比。图 2(a)为太赫兹差分成像系统的示意图^[17]。在本系统中,太赫兹辐射由光整流效应产生,通过飞秒激光照射 $\langle 110 \rangle$ ZnTe 晶体,利用 ZnTe 晶体的二阶非线性效应辐射太赫兹脉冲,探测方式采用准近场测量技术。携带太赫兹信息的探测光进入系统的成像单元[图 2(a)中蓝色虚线框部分]后,依次通过 $1/4$ 波片(QWP)和渥拉斯顿棱镜(PBS)。QWP 在探测光上加载了 $\pi/2$ 的相位,PBS 将探测光分解为两个正交的偏振分量。两个透镜 L4 和 L5 组成的 $4f$ 系统将两个探测光斑投影到 CCD 上,利用动态相减技术可以从两个探测光斑中获得两个极性相反的太赫兹光斑,再将两个太赫兹光斑进行相减可得到最终的太赫兹图像。图 2(b)展示了在两个太赫兹光斑相应位置处提取的太赫兹时域信号,可以看出它们具有相同的幅值和 π 的相移。从图 2(b)的插图中可以看出,这两个信号的噪声在时域上是完全对应的,因此二者相减可以将信号幅值提高 1 倍,同时抑制系统噪声,进而提高信噪比。

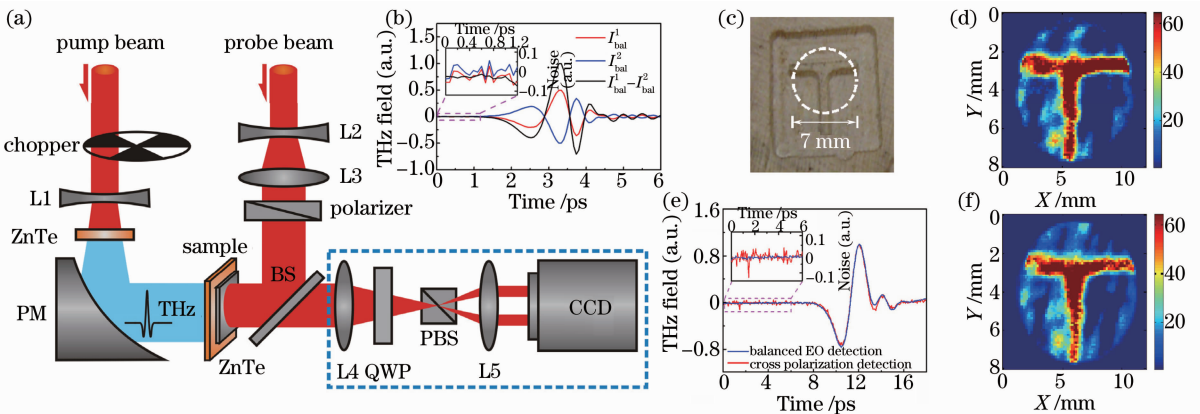


图 2 太赫兹差分成像。(a)太赫兹差分成像系统;(b)系统中相应两个像素点的太赫兹时域信号及二者的相减结果,插图展示了信号的噪声浮动;(c)“T”型木质浮雕样品;(d)和(f)为利用差分探测技术和传统探测技术所获得的样品太赫兹峰值强度图像;(e)展示了在(d)和(f)的相应像素上提取的太赫兹时域信号,插图展示了二者的噪声情况

Fig. 2 THz balanced imaging. (a) THz balanced imaging system; (b) THz temporal signals at corresponding two pixels extracted in the imaging system and their subtraction (inset gives their noise floors); (c) “T” pattern wooden embossment; (d) and (f) present the THz peak images of the sample by using the balanced detection and the conventional detection technique; (e) THz temporal signals at corresponding two pixels extracted from (d) and (f) (inset gives their noise floors)

为了验证此系统,选择了厚度为 5 mm 的“T”型木质浮雕作为样品进行测试,图 2(c)中的白色虚线框显示了成像区域,图 2(d)展示了所测量的太赫兹峰值强度。为了与传统技术进行比较,也使用偏振片检偏的方法对同一样品进行了测量,实验结果如图 2(f)所示。从这两幅图像中,都可以清晰地观察到样品的形态,两幅图像的质量几乎是一致的,这证明了将差分探测技术应用到太赫兹全息成像中,不会影响成像分辨率。在图 2(d)和(f)上选取了两个对应的像素点,并比较了它们的太赫兹时域信号,图 2(e)展示了实验结果。其中,蓝线是由差分探测技术获得的太赫兹信号,红线是由传统技术获得的太赫兹信号。可以看出,两者的波形是几乎一致的,而图 2(e)中的插图展示了用差分探测技术获得的信号,其噪声浮动比传统方法小得多。此结果有力地证明了,将差分探测技术应用于太赫兹成像可以有效地提高系统信噪比,增强测量精度。

2.3 太赫兹偏振成像

通过对太赫兹全息成像系统的不断改进,其已经具有了较高的系统信噪比,并且可以对样品的精细结构进行准确测量。然而,这些改进主要是针对测量太赫兹电场的单一偏振分量而言的,并不能反映太赫兹偏振态的变化情况。由于自然界存在着很多对于太赫兹偏振态有影响的物质,因此对这些物质进行研究时,就必须考虑偏振的因素。在 2010 年,本课题组通过进一步改进太赫兹差分成像系统,提出了一种太赫兹偏振测量方法,完成了对太赫兹偏振图像的精确提取。图 3(a)展示了太赫兹偏振成像系统,其与太赫兹差分成像系统基本一致,不同之处是在探测光路中加入了 1/2 波片(HWP),以便调整探测光的偏振态^[18]。由于在差分成像中,所测量的太赫兹信号可以表示为

$$I(\varphi, \delta) = I_{\text{tot}} \frac{\omega n^3 E_{\text{THz}} r_{41} L}{2c} (\cos \varphi \sin 2\delta + 2 \sin \varphi \cos 2\delta), \quad (1)$$

式中 n 和 L 是探测晶体的折射率和厚度, r_{41} 是探测晶体的非线性系数,角度 δ 为探测光偏振态与探测晶体 $\langle 110 \rangle$ 方向的夹角,角度 φ 为太赫兹偏振态与探测晶体 $\langle 110 \rangle$ 方向夹角,代入(1)式有

$$\begin{aligned} I(\varphi = 90^\circ, \delta = 0^\circ) &= 2H, \\ I(\varphi = 0^\circ, \delta = 0^\circ) &= 0, \\ I(\varphi = 90^\circ, \delta = 45^\circ) &= 0, \\ I(\varphi = 0^\circ, \delta = 45^\circ) &= H, \\ H &= I_{\text{tot}} \frac{\omega n^3 E_{\text{THz}} r_{41} L}{2c}. \end{aligned} \quad (2)$$

不难看出,当探测光偏振态与探测晶体 $\langle 110 \rangle$ 方向平行时(即 $\varphi = 90^\circ, \delta = 0^\circ$),太赫兹水平偏振分量被测量;当探测光偏振态与探测晶体 $\langle 110 \rangle$ 方向成 45° 时(即 $\varphi = 0^\circ, \delta = 45^\circ$),太赫兹竖直偏振分量被测量,其中需要考虑有一个 1/2 的系数。 $\langle 110 \rangle$ ZnTe 晶体的此特性可以成为测量太赫兹偏振态的有效方法,只需要改变探测光的偏振态,调整其与 ZnTe 晶体 $\langle 110 \rangle$ 方向的角度,就可以对太赫兹电场的两个偏振分量分别进行测量,这也就是系统中 HWP 的作用。为了检验系统的偏振测量精度,将一个太赫兹金属线栅偏振片放入太赫兹光路,并转动偏振片调整太赫兹光束的偏振方向,实验结果如图 3(b)所示。偏振片的角度从 0° 到 10° ,步长为 1° ,图中三角点为实验得到的太赫兹偏振角度,紫色实线为实际角度。可以看出,二者的最大偏差不超过 $\pm 0.35^\circ$,因此本系统的最小测量精度至少可以达到 0.5° 。

利用此系统,测量了两组样品。第一组样品如图 3(c)所示,包括空气、石英玻璃、载玻片和 0° 切割的石英晶体。其中石英晶体对太赫兹电场有双折射特性,石英晶体的光轴被调整为与入射太赫兹电场的水平偏振方向成 40° ,以便产生较大的太赫兹竖直偏振分量。测量了透过样品的太赫兹水平和竖直偏振分量 $I_{\text{hor.}}$ 和 $I_{\text{ver.}}$,并计算了透射太赫兹电场的偏振度 $(I_{\text{hor.}} - I_{\text{ver.}})/(I_{\text{hor.}} + I_{\text{ver.}})$,实验结果如图 3(d)所示。可以看出在空气、石英玻璃、载玻片的区域,太赫兹电场的偏振度几乎为 1,而在石英晶体的区域,太赫兹电场的偏振度达到了 0.48,石英晶体对太赫兹偏振态的影响可以清晰地表现出来。第二组样品,选取了两片石英晶体,并将二者部分重叠进行测量,样品如图 3(e)所示。图 3(f)展示了透射太赫兹电场的偏振度分布,可以看出在空气的部分偏振度为 1;在一片石英晶体的部分,偏振度达到了 0.8;在两片石英晶体的部分,偏振度达到了 0.3。可见,较厚的石英晶体将导致太赫兹竖直偏振分量具有较大的比重。以上实验结果证明了所搭建的太赫兹成像系统具有较好的偏振成像性能,这为发展太赫兹数字全息术提供了更为有力的测量手段。

3 太赫兹数字全息术的应用

3.1 太赫兹 Metasurface 样品表征

当前,利用金属或半导体表面的微纳结构实现对电磁场的特殊调制已经成为光学领域的研究前沿。这类结构的诞生为微型光学元件的加工和集

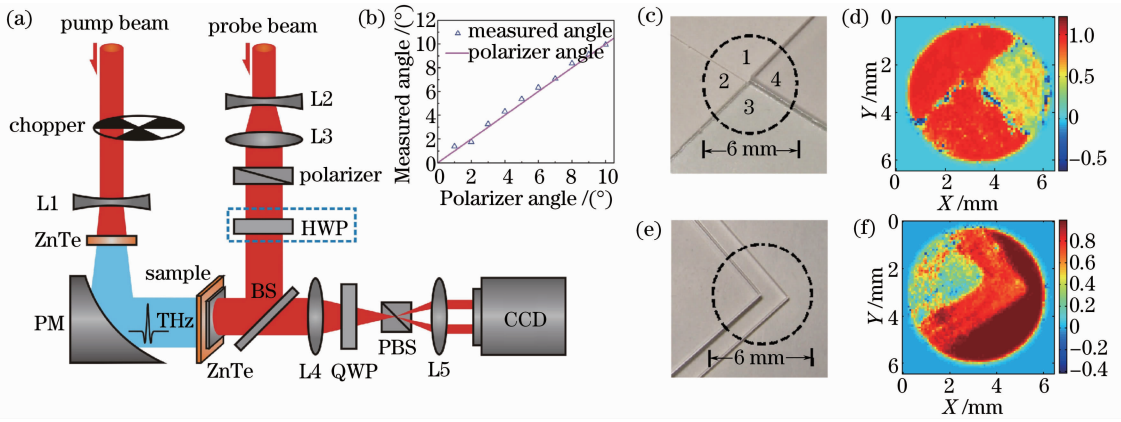


图 3 太赫兹偏振成像。(a)太赫兹偏振成像系统；(b)太赫兹偏振角度随太赫兹偏振片旋转的变化；(c)测试样品一：1. 空气、2. 石英玻璃、3. 载玻片、4. 石英晶体；(d)样品一的太赫兹偏振度图像；(e)测试样品二，两片石英晶体部分重叠；(f)样品二的太赫兹偏振度图像

Fig. 3 THz polarization imaging. (a) THz polarization imaging system; (b) variation of THz polarization angle with the rotation of the THz polarizer; (c) sample 1, including 1. air, 2. quartz glass, 3. slide glass, 4. quartz crystal; (d) THz polarization degree image of the sample 1; (e) sample 2: two quartz crystals partly overlapped; (f) THz polarization degree image of the sample 2

成光学系统的研发提供了有力的支撑，人们将这种材料定义为 Metamaterial。在 Metamaterial 的家族中，有一类特殊的器件，可以对电磁场的波前进行有效调控，称之为 Metasurface。Metasurface 不同于传统的光学元件，并不是通过相位积累进行波前调控，而是由器件表面的瞬态电流所产生的二次电磁辐射来实现波前调控，因此利用这一机制可以研发出各种超薄光学元件。

2013 年，本课题组将这一技术引入到太赫兹波段，设计了一种 V 型天线结构，如图 4(a) 所示^[19]。天线单元所对应的中心频率为 0.75 THz，通过改变 V 型天线的开口角度 θ 及天线单臂长度 h ，可以对

透射的正交偏振太赫兹电场进行不同程度的相位调制。图 4(b) 展示了利用时域有限差分 (FDTD) 算法所模拟的八个天线单元的透射特性以及它们的镜像结构。每一个天线单元的大小为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ， θ 和 h 的取值分别为 $130^\circ, 120^\circ, 100^\circ, 60^\circ$ 和 $78 \mu\text{m}, 82 \mu\text{m}, 90 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出，透射太赫兹电场具有几乎一致的振幅 (蓝线所示)，而相邻天线单元之间的相位差为 $\pi/4$ (红线所示)。利用这些天线结构，设计了各种超薄太赫兹平板元件，包括太赫兹透镜、太赫兹全息相位板和太赫兹涡旋相位板。搭建的太赫兹全息成像系统为这些器件的性能表征提供了极好的测试平台。

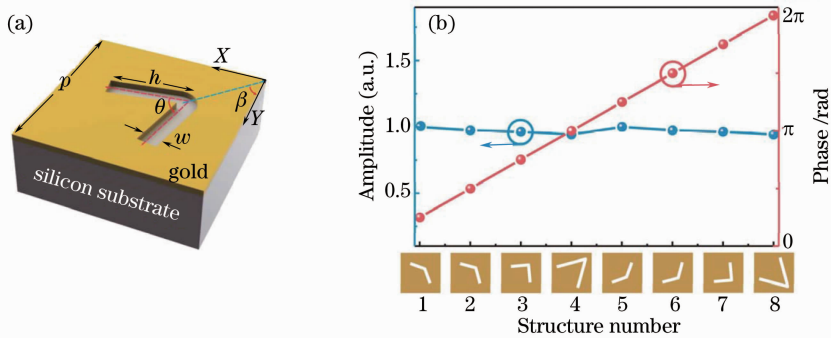


图 4 V 型天线的设计。(a)V 型天线单元的设计图；(b)从八种 V 型天线透射的正交偏振太赫兹电场的振幅和相位曲线
Fig. 4 Design of the V shaped antenna. (a) Schematic view of a V shaped antenna cell; (b) simulated amplitudes and phases of the transmitted cross-polarized THz fields from eight designed V shaped antennas

3.1.1 太赫兹平板球透镜

图 5(a) 展示了所研制的平板太赫兹球透镜^[19]，

其焦距为 4 mm。采用传统的光刻方法和金属化处理技术，将其制作在一个 100 nm 厚的金膜上，其基

底是 $500\ \mu\text{m}$ 厚的高阻硅片。由于此器件所对应的中心波长是 $400\ \mu\text{m}$, 因此有效层厚度仅是波长的 $1/4000$, 这对于普通光学元件是不可想象的。将此器件放入太赫兹成像系统, 确保入射光是水平偏振, 利用成像系统的偏振测量功能, 对从器件出射的竖直太赫兹偏振分量进行测量。图 5(b) 展示了在预设的焦平面上所获得的 $0.75\ \text{THz}$ 强度图像, 可以看出太赫兹光波被很好地聚焦, 焦斑大小约为 $260\ \mu\text{m}$, 这验证了所设计的平板太赫兹透镜的聚焦

性能。还验证了此平板透镜的成像性能, 将三个金属片镂空字母“C”、“N”、“U”[如图 5(c)所示]作为成像物体放入系统, 利用平板透镜将三个字母的缩小实像投影到探测晶体上进行测量。图 5(d)展示了测量结果, 可以看出三个字母的图像被清晰地表征出来。此工作的意义在于, 将太赫兹元件从很大的体积缩小到了微纳量级, 类似于用一个卡片相机实现了单反相机的功能, 为太赫兹小型化系统的研发指引了方向。

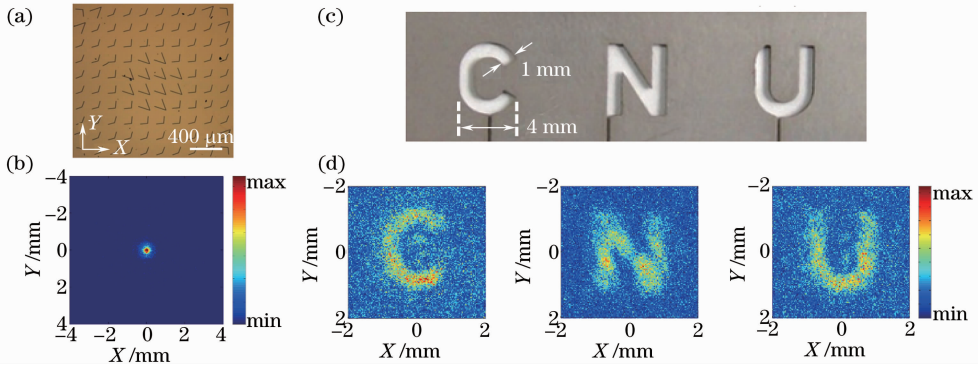


图 5 太赫兹平板球透镜的聚焦与成像性能。(a)太赫兹平板球透镜实物图;

(b)在预设焦平面上的太赫兹焦斑图像;(c)测试样品的照片;(d)样品的 $0.75\ \text{THz}$ 图像

Fig. 5 Focusing and imaging performances of the THz planar spherical lens. (a) Photograph of the THz planar spherical lens; (b) THz focal spot on the preset focal plane; (c) photograph of the object to be imaged; (d) $0.75\ \text{THz}$ image of the object

3.1.2 太赫兹全息相位板

由于每个天线单元对太赫兹光波具有相同的强度透射特性, 因而利用它们可以进行纯相位调制。通过 Gerchberg-Saxton 迭代算法设计了两个计算全息相位板, 如图 6(a)和(b)所示^[19]。当太赫兹光波透过相位板后, 在预设的衍射面上将形成特殊的

光场分布, 图 6(c)和(d)展示了理论计算的结果, 太赫兹光场在传播 $4\ \text{mm}$ 后形成了“C”和“N”两个字母。图 6(e)和(f)展示了实验测量结果, 可以看出两个字母的形状是非常清晰的, 全息图的相位调制特性被很好地验证, 其中字母上的强度不均匀主要来自于样品设计中的相位不连续分布。

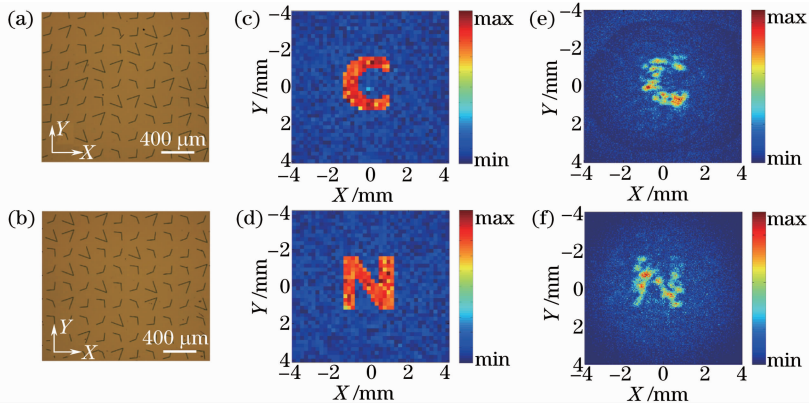


图 6 太赫兹全息相位板的特殊光场调制。(a),(b)太赫兹全息相位板实物图;

(c),(d)在预设衍射面上的模拟光场分布;(e),(f)实验所测得的由相位板产生的太赫兹图像

Fig. 6 THz phase holograms for the special optical field generation. (a), (b) Photograph of the THz phase holograms; (c), (d) simulated optical field distribution on the preset diffraction plane; (e), (f) experimental THz images generated by the phase holograms

3.1.3 太赫兹涡旋相位板

涡旋光束在光学领域一直是一个特殊的研究对象,它具有螺旋波前、轴心上的相位奇点、量子化的轨道角动量等特点,可以应用在粒子的微操控和光学信息传输等方面。太赫兹涡旋光束的研究一直处于停滞状态,这主要是由于在太赫兹波段缺乏适当的涡旋相位板和测量方法。利用所设计的V型天线组成了超薄太赫兹涡旋相位板(VPP),并利用太赫兹全息成像系统的相位测量功能研究了所生成的涡旋太赫兹光束的远场传输特性。图7(a)展示了所设计的太赫兹涡旋相位板^[20],将其放入太赫兹成像系统进行表征,图7(b)展示了透射太赫兹电场的相位分布,可以看出其呈现了所预设的涡旋变化。随着方位角的增大,太赫兹电场的相位从 $-3\pi/4$ 到 π 线性增

加,验证了太赫兹涡旋相位板的有效性。

为了研究涡旋光束在远场的衍射特性,利用一个硅透镜将太赫兹涡旋光束聚焦,并在焦点位置附近对其进行Z扫描测量,装置如图7(c)所示。图7(d)展示了在距离焦点位置 -20 、 -10 、 0 、 10 、 20 mm处的太赫兹相位分布。可以看出,太赫兹相位呈现出了螺旋变化,且随着传播一直沿顺时针方向旋转。在通过焦点后,螺旋的旋进方向发生了反转。为了描述这些变化,利用Laguerre-Gaussian模型对其进行了模拟,模拟结果如图7(e)所示,可以看出其完全重现了所测量得到的现象。本工作的完成对于太赫兹特殊光束的研究、太赫兹信息传输以及太赫兹平板微纳光学元件的研发都具有积极的推动作用。

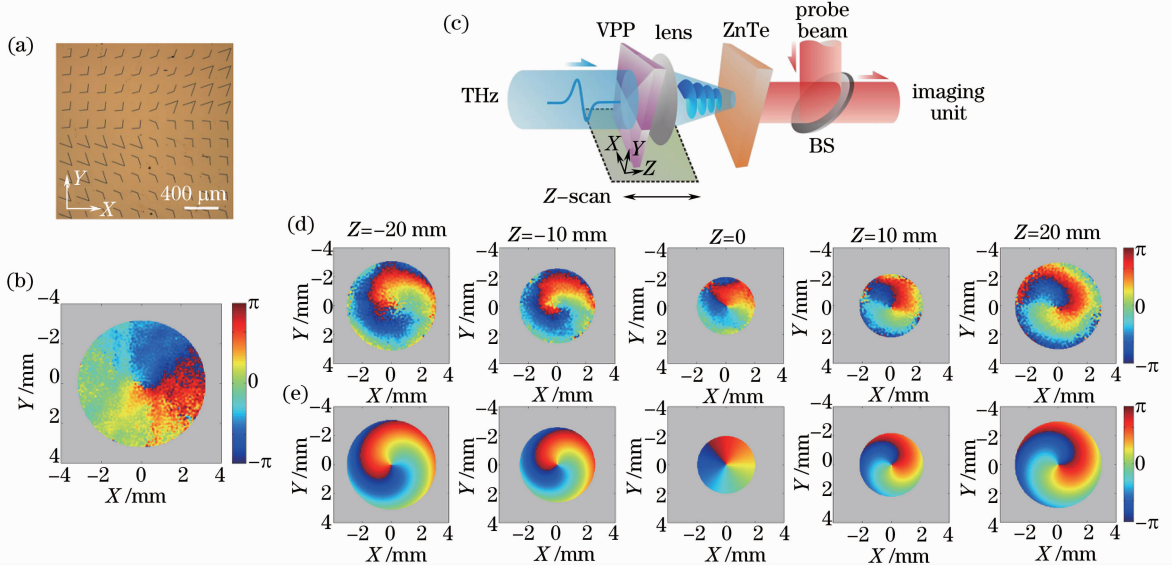


图7 太赫兹涡旋光束研究。(a)太赫兹涡旋相位板实物图;(b)太赫兹涡旋光束的相位分布;(c)测量太赫兹涡旋光束聚焦过程的实验系统;(d)由实验测得的距离焦点位置 -20 、 -10 、 0 、 10 、 20 mm位置处的太赫兹相位分布;(e)在不同观测面上的模拟太赫兹相位分布

Fig.7 Studies of the THz vortex beam. (a) Photograph of the THz vortex phase plate; (b) phase distribution of the THz vortex beam; (c) experimental setup for observing the focusing process of the THz vortex beam; (d) experimental phase maps of the THz vortex beam with $Z = -20, -10, 0, 10, 20$ mm; (e) simulated phase maps of the THz vortex beam on different observation planes

3.2 对太赫兹波导性能进行测量

太赫兹波导的研究对于太赫兹系统的小型化、集成化是极为有利的。目前已经有很多不同种类的太赫兹波导被报道,例如金属管波导、金属丝波导、金属平行板波导、介质管波导等。通过对波导输出的电磁波进行横模测量,可以确定电磁波在波导内的传输模式,进而对波导的色散特性进行准确分析,例如传输损耗和群速度色散等。2012年,本课题组利用太赫兹数字全息术对一种金属共轴波导进行了

模式测量,分析了金属共轴波导的色散特性。

图8(a)展示了所选用的金属共轴波导,其为商用电缆线(型号:SYV-50-3-41),在工业和科研中被广泛使用^[21]。波导具有一根半径为 0.45 mm的金属芯,外圈的金属网格层内径为 1.50 mm,由于金属网格排列紧密,可视为均匀金属层。在内外导体之间是电介质层,材料为聚四氟乙烯,波导中的电磁波主要分布在其中。将波导放入太赫兹全息成像系统中,测量从波导端面输出的太赫兹光波,实验装置

如图 8(b)所示。图 8(c)和(d)分别展示了 0.5 THz 电场水平和竖直偏振分量。水平偏振分量呈现了环形分布,同时环上的光场并不均匀,在水平方向上存在两个极大值;竖直偏振分量呈现了四个环绕金属芯的光场极大值分布。为了便于分析,将图 8(c)和(d)中的光场分布转换到极坐标 (r, φ) 。图 8(e)和(f)展示了 0.5 THz 电场的 r 和 φ 分量,它们分别呈现了两个左右和上下对称的半月形分布。为了分析在波导内部电场的传输模式,利用经典的共轴波导

电磁场模型进行了仿真,并发现当将四个电场模式进行线性加权叠加时,即 $TE_{11} + 0.625TE_{12} + 0.625TM_{11} + 0.625TM_{12}$, 仿真结果可以很好地重现实验现象,如图 8(g)和(h)所示。选取这四个模式的原因在于,这四个模式属于低阶模式,传输损耗较小,并且这四个模式具有明显的水平偏振特性,由于入射波导的太赫兹电场是水平偏振的,因此这四个模式是最容易被激发的。

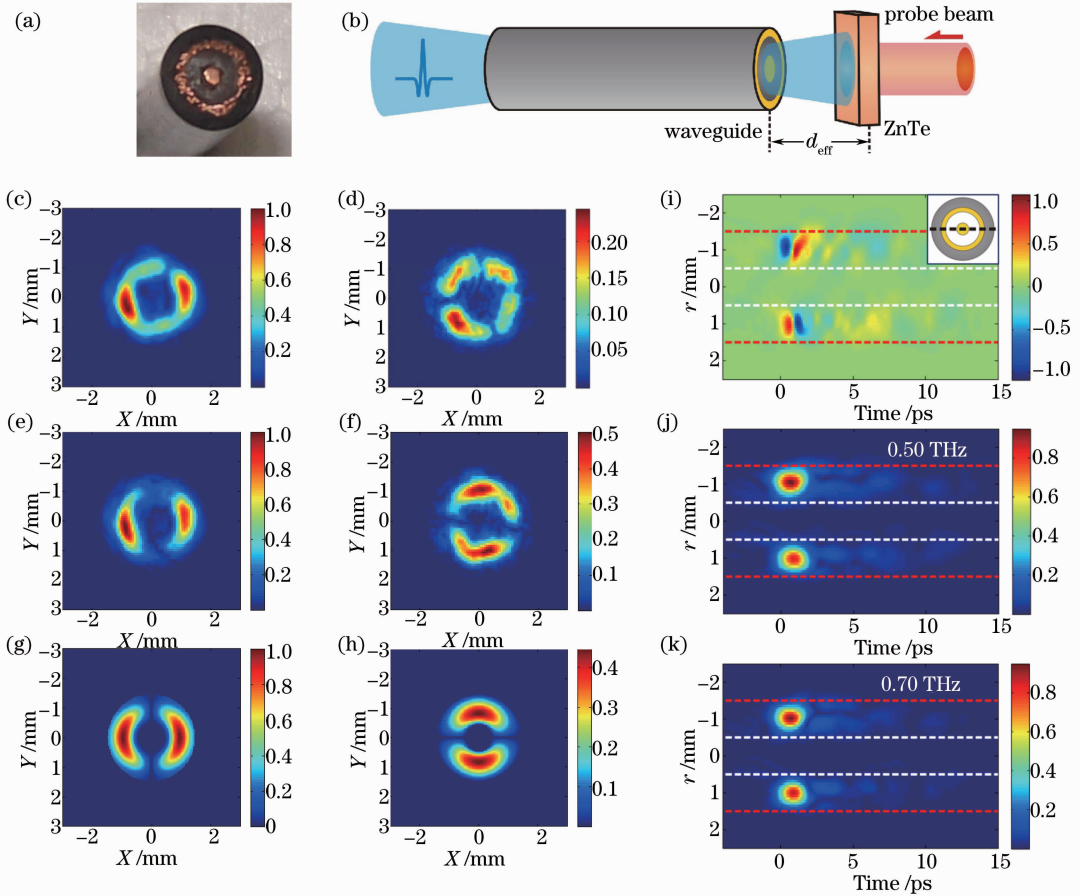


图 8 太赫兹金属共轴波导传输模式的测量。(a)太赫兹金属共轴波导的实物图;(b)测量波导传输模式的实验系统图;(c),(d)实验测得的 0.5 THz 水平和竖直偏振分量;(e),(f)在极坐标系下的 0.5 THz 电场的 r 和 φ 分量;(g),(h)通过对四个波导模式 TE_{11} 、 TE_{12} 、 TM_{11} 、 TM_{12} 进行加权叠加的模拟结果;(i)在插图中黑色虚线位置上,实验测得的太赫兹电场 r 分量的时空分布图;(j),(k)从图(i)中提取的 0.5 THz 和 0.7 THz 频谱分量时空分布图

Fig. 8 Measurement of the transmission modes of the THz metallic coaxial waveguide. (a) Photograph of the THz metallic coaxial waveguide; (b) experimental system for observing the waveguide modes; (c), (d) experimental 0.5 THz images for the horizontal and vertical polarization components; (e), (f) r and φ components of the 0.5 THz field in polar coordinates; (g), (h) simulated results by weighted stacking four waveguide modes TE_{11} , TE_{12} , TM_{11} and TM_{12} ; (i) space-time maps of the r electric field component at the position of the dark dashed line in the inset; (j), (k) space-time maps of the 0.5 THz and 0.7 THz components extracted from (i)

为了分析金属共轴波导的色散特性,在波导的中心线位置处[如图 8(i)的插图中黑色虚线所示]选取了一系列太赫兹电场 r 分量的数据,图 8(i)展示了

其时空分布图。其中,红色和白色虚线分别表示内外导体的边界位置,可以看出太赫兹电场被很好地局域在了电介质层内部,并且其主要能量集中在

1.5 ps的波包内,没有表现出明显的波形展宽。利用窗口傅里叶变换对图 8(i)进行分解,提取了0.5 THz频谱分量的时空分布图,如图 8(j)所示。可以看出四个波导模式在时间域上没有表现出来明显的分离,这说明它们的群速度是一致的。也同样提取了其他频谱分量的时空分布图,图 8(k)展示了0.70 THz分量的结果。可以看出其与图 8(j)基本是一样的,这说明四个波导模式具有相同的群速度色散,这也解释了在图 8(i)中所示的,太赫兹脉冲通过波导后展宽并不明显的现象。本工作的完成一方面验证了金属共轴波导对于太赫兹信号传输的良好特性,另一方面也扩展了太赫兹数字全息的应用范围,证明了其可以作为一项有力的测量手段对太赫兹波导性能进行表征。

3.3 对聚焦太赫兹光束的 Gouy 相移进行测量

太赫兹数字全息术可以对电磁波的波前相位直接进行观测,因此利用此技术还可以对很多基础物

理问题进行分析。2013年,将此技术应用到了对光学领域中的一个有趣的现象——Gouy相移的观测。所谓Gouy相移是指当一个光波被球透镜聚焦时,在通过焦点后,光轴上的相位存在一个 π 的转变。这一现象对于激光器的腔形设计、光学相干层析术、参量非线性光学显微技术的发展都有不可忽略的影响,因此在实验和理论上,对于Gouy相移的研究一直不曾中断。在本工作中,选取了一个焦距为50 mm的高密度聚乙烯透镜(HDPL)放入太赫兹成像系统中,并在焦点附近进行Z扫描测量,如图9(a)所示^[22]。由于入射的太赫兹电场可以看成平面波,因此通过这种测量方式可以将太赫兹光波的聚焦过程准确地记录下来。图9(b)~(d)分别展示了1.3 THz分量在距离焦点-22、0、28 mm位置处的相位分布。可以看出,在聚焦之前太赫兹波前呈现出了准高斯型的分布,这是由聚乙烯透镜所引起的;在焦平面上,太赫兹波前呈现了平面分布;在通过焦

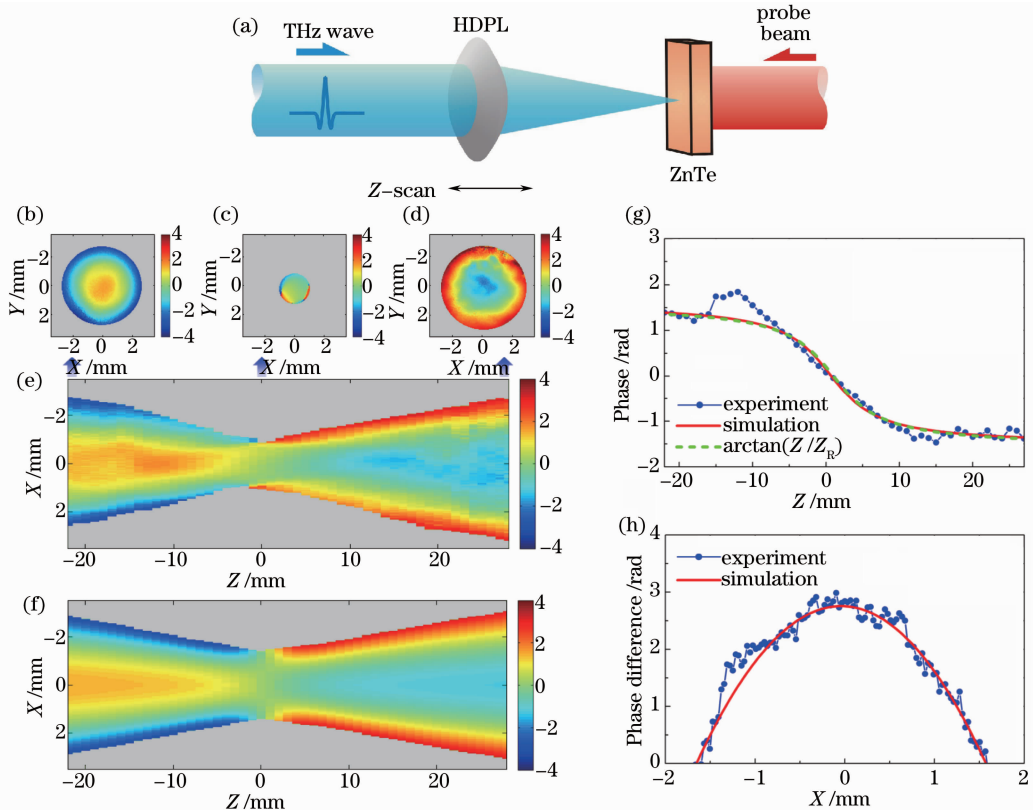


图9 聚焦太赫兹光束 Gouy 相移的观测。(a) 观测聚焦太赫兹光束 Gouy 相移的实验系统;(b),(c),(d) 距离焦点位置 $Z = -22, 0, 28$ mm 处的 1.3 THz 光场相位分布;(e) 纵向相位分布;(f) 模拟的纵向相位分布;(g),(h) Gouy 相移的纵向和横向分布

Fig.9 Observation of the Gouy phase shift of the converging THz beam. (a) Experimental system for observing the Gouy phase shift of the converging THz beam; (b), (c), (d) phase distributions of the 1.3 THz component with $Z = -22, 0, 28$ mm; (e) longitudinal phase distribution; (f) simulated longitudinal phase distribution; (g), (h) longitudinal and transverse distributions of the Gouy phase shift

点以后,其呈现了反高斯型的分布,这些现象与高斯光束的聚焦特性是一致的。分别提取了不同测量截面上中心线处的相位数据,组成了聚焦过程中的纵向相位分布,如图 9(e)所示。从图中可以清晰地观察太赫兹光束在聚焦过程中相位的变化。当太赫兹光波靠近焦点时,在光轴上的相位逐渐从 1.5 减少到 0;当太赫兹光波通过并远离焦点时,光轴上的相位继续从 0 减少到 -1.5。在此测量过程中,太赫兹光束的总体光程没有发生改变,因此可以确定所观测到的相位演变是来自于聚乙烯透镜的波前调制,也就是 Gouy 相移。为了解释所观测的现象,考虑聚乙烯透镜所引入的高斯相位分布和太赫兹光波经历的非涅耳衍射,对此物理过程进行了仿真,所获得的纵向相位分布如图 9(f)所示。仿真结果可以很好地重现实验结果,这说明在仿真中所考虑的物理问题是充足的。可以得出结论,Gouy 相移主要来自于聚乙烯透镜对太赫兹光波的横向限制。当太赫兹光波通过透镜时,透镜会引入不为零的横向波矢 k_x 和 k_y ,这将在光波的传播过程中引入附加相位,也就是 Gouy 相移。

为了更加清晰地观测 Gouy 相移,从图 9(e)和 (f)的光轴上提取出了相位数据列,如图 9(g)所示。蓝色点线是实验结果,红色实线是仿真结果,二者都很好地呈现了所预期的 Gouy 相移。需要指出,在聚焦前后的相移稍小于 π ,这是测量范围的限制所导致的。为了进行比较,也利用 Gouy 相移公式 $-\arctan(Z/Z_R)$ 进行计算,其中 Z_R 为瑞利范围。计算结果是图 9(g)中的绿色虚线,可以看出三者完全吻合。利用太赫兹成像系统还观测了太赫兹光波在焦点前后的横向相位差。通过提取距离焦点 -22 mm 和 28 mm 位置处的横向相位分布,并将二者相减,图 9(h)展示了测量和仿真结果。可以看出,相位差只有在光轴附近时才接近于 π ,当远离焦斑区域后,相位差将迅速减小并呈现类似高斯分布的线型。这一现象表明了 Gouy 相移仅是横向相位差中的一个特例。本工作的完成对于更全面地理解 Gouy 相移的特性是有益的,同时也证明了利用太赫兹数字全息术对基础物理问题进行观测的可行性。

4 结束语

综述了本课题组近年在发展太赫兹数字全息术方面所做的一些努力。在开发太赫兹全息成像系统方面,搭建了一套太赫兹准近场成像系统,将太赫兹成像的分辨率提高了一个量级;提出了一种差分成

像测量技术,将太赫兹成像的系统信噪比提高了 4 倍左右;提出了一种偏振测量方法,使得太赫兹成像系统可以测量物质的偏振特性。在太赫兹数字全息术的应用方面,将此技术分别应用于对超薄平板太赫兹器件的性能进行表征,对金属共轴太赫兹波导的传播模式进行测量,以及对聚焦太赫兹光束产生的 Gouy 相移进行观测。

太赫兹数字全息术发展至今已经形成了较为成熟的技术体系,由于其可以对物质全方位的光学信息进行精准测量,对于分析光与物质相互作用是一项强有力的研究手段。根据本课题的研究和已发表的报道,太赫兹数字全息术正逐步被应用于微纳光学器件表征、生物制药成像、光学信息传输、半导体载流子输运以及众多基础物理化学问题的研究中。同时,太赫兹数字全息术要想应用于工业生产还必须克服一些技术难关,例如:目前太赫兹电场波前信息的获取要通过电光晶体进行测量,这限制了成像面积的大小;太赫兹图像信息的获取是通过 CCD 进行采集的,由于不能采用锁相技术进行滤波,对于信噪比的提高还存在一定限制;太赫兹时域信号是通过调整太赫兹光路与探测光路的光程差进行扫描的,这使得实验时间难以进一步缩短。尽管太赫兹数字全息术真正用于人们的生产生活还有一些问题需要解决,但随着太赫兹光子学领域的不断发展,更强的太赫兹源、更灵敏的太赫兹探测技术以及众多太赫兹波段的光学器件不断地被开发和研制,太赫兹数字全息术终将广泛普及。本团队将继续致力于此项技术的开发和应用,推动其实用化、工业化,为祖国科研事业的腾飞和人民生活质量的提高做出贡献。

参 考 文 献

- 1 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(10): 1349-1359.
孙 博,姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1349-1359.
- 2 Q Wu, M Litz, X C Zhang. Broadband detection capability of ZnTe electro-optic field detectors[J]. Appl Phys Lett, 1996, 68(21): 2924-2926.
- 3 J M Dai, X Xie, X C Zhang. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(10): 103903.
- 4 Wang Linghui, Wang Yingxin, Liu Yuanyuan, et al.. Establishment and the usage of terahertz spectral database[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0815002.
王凌辉,王迎新,刘圆圆,等. 太赫兹光谱数据库的建立和使用[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0815002.
- 5 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, et al.. Advances in research on THz digital holographic imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050006.

- 李琦, 丁胜辉, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050006.
- 6 Liang Lanju, Yan Xin, Yao Jianquan, *et al.*. Two-dimensional left-handed material based on parallel metallic double rods in terahertz wave[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0316001. 梁兰菊, 闫昕, 姚建铨, 等. 基于平行金属双柱的太赫兹波二维左手材料[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0316001.
- 7 Zhang Gaohui, Zhao Guozhong. Numerical simulation of terahertz transmission through rectangular hole of metallic structure on substrate with different thicknesses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1130001. 张皋辉, 赵国忠. 不同厚度衬底上矩形孔金属结构的太赫兹透射特性数值分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1130001.
- 8 Kang Shengwu, Wang Jiping, Liu Kan, *et al.*. Analysis of the spectral characters of terahertz-wave[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612001. 康胜武, 汪继平, 刘侃, 等. 太赫兹波光谱特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0612001.
- 9 Lu Shuhua. Detection of explosives by terahertz spectroscopic techniques[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040006. 卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040006.
- 10 He Jun, Mu Kaijun, Yang Hua, *et al.*. Experimental study of super-broadband terahertz coherent detection with air plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 103002. 赫君, 牧凯军, 杨华, 等. 空气等离子体探测太赫兹超宽谱实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 103002.
- 11 Li Xinlei, Li Biao. Review on progress of real-time THz sensing and imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090008. 李昕磊, 李彪. 实时太赫兹探测与成像技术新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 090008.
- 12 Q Wu, T D Hewitt, X C Zhang. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(8): 1026-1028.
- 13 M Usami, M Yamashita, K Fukushima, *et al.*. Terahertz wideband spectroscopic imaging based on two-dimensional electro-optic sampling technique[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(14): 141109.
- 14 T Yasuda, Y Kawada, H Toyoda, *et al.*. Terahertz movies of internal transmission images[J]. Opt Express, 2007, 15(23): 15583-15588.
- 15 X K Wang, Y Cui, W F Sun, *et al.*. Terahertz pulse reflective focal-plane tomography[J]. Opt Express, 2007, 15(22): 14369-14375.
- 16 X K Wang, Y Cui, D Hu, *et al.*. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. Opt Commun, 2009, 282(24): 4683-4687.
- 17 X K Wang, Y Cui, W F Sun, *et al.*. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. Opt Commun, 2010, 283(23): 4626-4632.
- 18 X K Wang, Y Cui, W F Sun, *et al.*. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27(11): 2387-2393.
- 19 D Hu, X K Wang, S F Feng, *et al.*. Ultrathin terahertz planar elements[J]. Adv Opt Mater, 2013, 1(2): 186-191.
- 20 J W He, X K Wang, D Hu, *et al.*. Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. Opt Express, 2013, 21(17): 20230-20239.
- 21 X K Wang, W Xiong, W F Sun, *et al.*. Coaxial waveguide mode reconstruction and analysis with THz digital holography[J]. Opt Express, 2012, 20(7): 7706-7715.
- 22 X K Wang, W F Sun, Y Cui, *et al.*. Complete presentation of the Gouy phase shift with the THz digital holography[J]. Opt Express, 2013, 21(2): 2337-2346.

栏目编辑:何卓铭