



DOI: 10.12086/oe.2020.190413

## 太赫兹脉冲焦平面成像技术的发展与应用

王新柯, 张岩\*

首都师范大学物理系; 超材料与器件北京市重点实验室, 北京 100048

**摘要:** 作为太赫兹技术中的重要组成部分, 太赫兹脉冲焦平面成像一经问世就引起了行业内的广泛关注, 人们引入了各种方法去提升此成像技术的测量性能, 同时也尝试将此成像技术应用于不同的工业和基础研究领域。本文综述了近年来人们对太赫兹脉冲焦平面成像的技术改良和应用研究, 包括提升成像系统的空间分辨率、信噪比、信息获取能力, 以及将此成像技术应用于光谱识别检测、超表面器件功能验证、太赫兹特殊光束测量、太赫兹表面波观测等, 希望该综述能够推动太赫兹脉冲焦平面成像的进一步技术革新和应用拓展。

**关键词:** 太赫兹; 焦平面成像; 分辨率; 超表面

**中图分类号:** O441.4; O433.1

**文献标志码:** A

**引用格式:** 王新柯, 张岩. 太赫兹脉冲焦平面成像技术的发展与应用[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190413

## Advancement and application of terahertz pulsed focal-plane imaging technique

Wang Xinke, Zhang Yan\*

Beijing Key Lab for Metamaterials and Devices; Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

**Abstract:** As an important composition of terahertz (THz) technology, THz pulsed focal-plane imaging has been paid widely attention since it was invented. Until now, researchers have introduced all kinds of methods to enhance the performance of this imaging technique. Simultaneously, this imaging technique has been tried to apply into various industrial and fundamental research fields. In this paper, recent technique improvements and application researches for THz pulsed focal-plane imaging are reviewed, including the spatial resolution enhancement, signal-to-noise ratio improvement, information acquiring ability as well as applications of this imaging technique in spectroscopic identification inspections, function demonstrations of meta-surface devices, measurements of THz special beams, observations of THz surface electromagnetic waves, and so on. The aim of this paper is to push the technique innovation and application exploration of THz pulsed focal-plane imaging.

**Keywords:** terahertz; focal-plane imaging; resolution; meta-surface

**Citation:** Wang X K, Zhang Y. Advancement and application of terahertz pulsed focal-plane imaging technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190413

收稿日期: 2019-07-19; 收到修改稿日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11474206, 11404224, 11774243, 11774246)

作者简介: 王新柯(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事太赫兹光谱与成像技术的研究。E-mail: wxk82721@cnu.edu.cn

通信作者: 张岩(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹光谱与成像、微纳光子学、数字全息等方面的研究。

E-mail: yzhang@mail.cnu.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

# 1 引言

太赫兹(Terahertz, THz)辐射是指波长处于亚毫米量级(波长 3 mm~30  $\mu\text{m}$ , 对应频率 0.1 THz~10 THz)的电磁辐射, 由于太赫兹辐射所处波段的位置介于微波与红外之间, 因此使其兼备了很多微波与红外波段的性质, 例如水分子等极性物质对其吸收强烈、光谱信息丰富、对非极性物质透过率高、光子能量小等, 这些特性使得相关的太赫兹技术在物质识别<sup>[1]</sup>、通信技术<sup>[2]</sup>、生物检测<sup>[3-4]</sup>、无损探伤<sup>[5]</sup>、半导体工业<sup>[6]</sup>等诸多领域都具有很好的应用价值, 已经有众多国内外科研团队投身太赫兹技术的开发。其中, 太赫兹成像技术结合了光谱与成像的共同优势, 既可以对物质的形貌进行测量, 又可以通过简单的数据处理对物质的太赫兹光谱响应进行分析, 因此太赫兹成像技术已经成为了本领域的重要组成部分, 并已经发展出了众多测量模式, 例如透射成像<sup>[7]</sup>、反射成像<sup>[8]</sup>、CT 成像<sup>[9]</sup>、近场成像<sup>[10]</sup>、压缩感知成像<sup>[11]</sup>等一系列成像方法。

作为太赫兹成像中的重要发展分支, 太赫兹脉冲焦平面成像最早出现于 1996 年, 此技术一经提出就引起了业内研究人员的广泛关注, 并得到了快速的发展与应用。利用太赫兹脉冲焦平面成像仅需单次测量就可以获取物体的形貌信息, 避免了在传统太赫兹成像

中需要对物体进行逐点扫描的过程, 大大缩短了测量耗时, 并提高了测量的稳定性与采样率。随着研究的深入, 已经有各种技术手段被引入到了太赫兹脉冲焦平面成像之中去提高其测量性能, 并且此技术也已经在多个工业和研究领域展现了其强大的应用潜力。本文综述了本科研团队和国际相关课题组近年来在太赫兹脉冲焦平面成像方向上所完成的部分工作, 包括对于成像技术本身的革新以及应用此成像技术进行的研究工作。同时, 本文还对太赫兹脉冲焦平面成像目前尚待解决的问题和未来的前景进行了评述与展望。

# 2 太赫兹脉冲焦平面成像的出现与发展

## 2.1 太赫兹脉冲焦平面成像的诞生

太赫兹成像技术的发展开始于 1995 年, 在太赫兹时域光谱技术的基础上, Bell 实验室的 Hu 等<sup>[12]</sup>开拓性地提出了太赫兹逐点扫描成像技术, 从此开启了太赫兹成像的大门。图 1(a)展示了太赫兹逐点扫描成像的光路原理, 其与太赫兹时域光谱技术类似, 都是由一路激光分为两路分别激发太赫兹辐射源和探测器, 将产生的太赫兹辐射聚焦于待测样品的某个位置上, 通过连续调整太赫兹光路与探测光路之间的光程差对

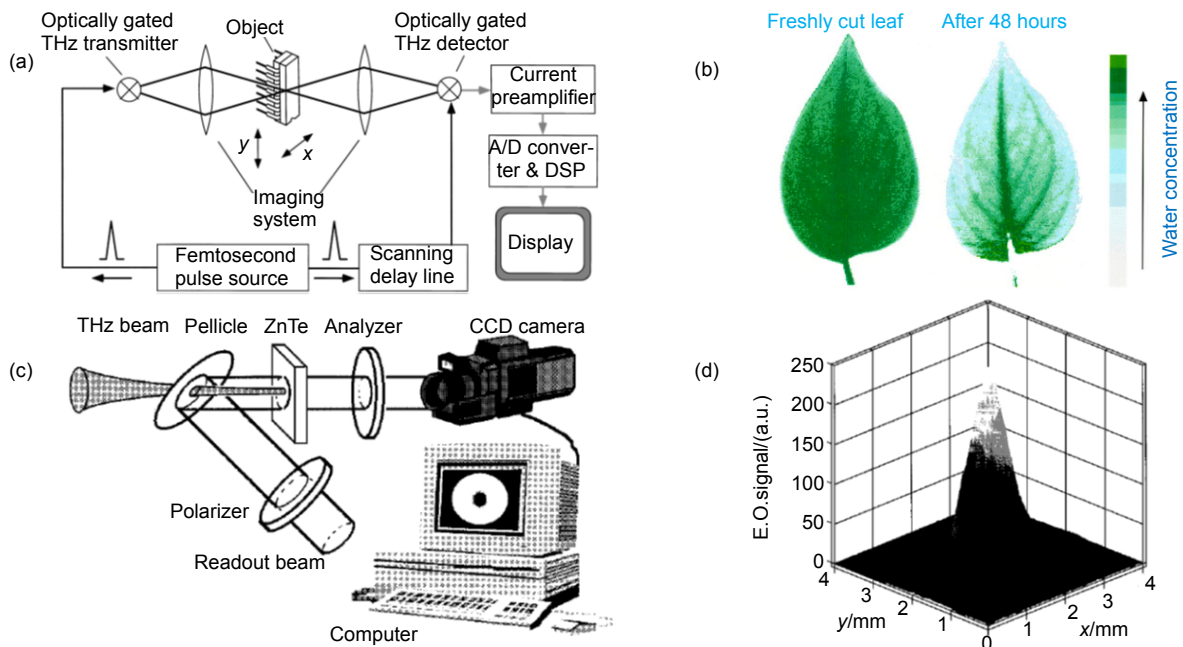


图 1 太赫兹脉冲焦平面成像与太赫兹逐点扫描成像的比较<sup>[12-13]</sup>。(a) 太赫兹逐点扫描成像; (b) 由太赫兹逐点扫描成像获得的树叶太赫兹强度图像; (c) 太赫兹脉冲焦平面成像; (d) 由太赫兹脉冲焦平面成像获得的太赫兹光斑分布

Fig. 1 Comparison of THz pulsed focal-plane imaging and THz raster scan imaging<sup>[12-13]</sup>.

(a) Scheme of a THz raster scan imaging system and (b) THz images of a leaf by THz raster scan imaging;

(c) Scheme of a THz pulsed focal-plane imaging system and (d) THz intensity distribution obtained by THz pulsed focal-plane imaging

太赫兹时域信号进行测量,并且通过不断调整样品与太赫兹焦斑的相对位置对整个样品区域进行扫描测量,获取样品每个位置处的太赫兹信号。由于所测量的太赫兹信号呈现了太赫兹电场的时间分辨响应,对太赫兹信号稍加处理就可以很方便地获得样品在太赫兹波段的各种光学信息,例如时域最大值图像、时域飞行时间图像、频域强度图像、频域折射率图像等。利用这一技术, Hu 等人成功观测了树叶在新鲜状态和脱水 48 h 后的太赫兹图像,如图 1(b)所示,首次显示了太赫兹成像的应用价值,这一工作无疑是太赫兹技术发展历史中的一个里程碑。然而,随着研究的深入,这一技术的限制也表现出来。主要可以归纳为两点: 1) 由于在测量过程中需要对样品上的每个位置分别进行扫描,这使得成像时间过长,通常测量一个 25 pixels×25 pixels 的图像,就需要约 10 h; 2) 由于需要不断移动样品与太赫兹光斑的相对位置,势必对测量过程中的稳定性造成一定影响,同时也限制了成像的采样率。

为了解决这些问题,提高太赫兹成像技术的测量性能,美国伦斯勒理工大学的 Zhang 等<sup>[13]</sup>在 1996 年首次提出并实现了太赫兹脉冲焦平面成像,极大地扩展了太赫兹成像的应用范围。图 1(c)展示了太赫兹脉冲焦平面成像的光路原理,其基本原理仍采用泵浦探测技术对太赫兹信号进行测量。利用电光采样原理,将扩束的太赫兹光场与扩束的探测光束重合,共同作用于电光晶体(例如<110>晶向 ZnTe 或 GaP 晶体)。在探测晶体的作用区域内,由于线性电光效应,太赫兹光场调制了晶体的双折射特性,并加载于探测光的偏振态上。为了滤除探测光中背景强度的影响,在探测晶体的两侧放置两个方向正交的偏振片,对探测光进行检偏,并用 CCD 摄像头获取探测光的二维分布。当太赫兹光场作用于探测晶体时,探测光的二维偏振态分布被调制,由 CCD 获取的探测光的强度变化反应了太赫兹光场的复振幅分布。所测量得到的探测光信号可以表达为<sup>[14]</sup>

$$I \approx I_{\text{tot}} \left( \frac{\omega L}{c} \right)^2 \frac{\Delta n_{\text{THz}} \Delta n_{\text{ZnTe}}}{2} \propto E_{\text{THz}} \quad (1)$$

其中:  $I_{\text{tot}}$  为探测光的初始光强,  $\omega$  为探测光的原频率,  $L$  为探测晶体厚度,  $c$  为真空光速,  $\Delta n_{\text{ZnTe}}$  为探测晶体本身双折射效应所导致的 o 光与 e 光折射率差,  $\Delta n_{\text{THz}}$  为由太赫兹光场所导致的探测晶体折射率改变。这里,由于  $\Delta n_{\text{THz}}$  正比于太赫兹光场  $E_{\text{THz}}$ , 所以测量得到的探

测光信号正比于太赫兹光场  $E_{\text{THz}}$ 。采用这种成像方式,可以一次性获取太赫兹光场的二维波前信息,因此在测量过程中不需要改变样品与太赫兹光场的相对位置,提高了测量稳定性,同时由于采用 CCD 作为记录媒介,大大提高了成像采样率,缩短了成像所需时间。图 1(d)展示了利用太赫兹脉冲焦平面成像获取的太赫兹光场强度分布,呈现高斯光束分布特征。在 2000 年, Zhang 等<sup>[15]</sup>又提出了动态相减技术,利用斩波器调制太赫兹信号的输出频率,并与 CCD 同步控制,进一步滤除了探测光中背景强度的影响,有效地提升了太赫兹脉冲焦平面成像的实用性。相比于逐点扫描成像,这种成像方式具有明显的优势,立刻在太赫兹领域成为了人们关注的热点。

## 2.2 太赫兹脉冲焦线成像

在 2008 年,日本大阪大学 Yasui 等<sup>[16]</sup>对太赫兹成像的发展提出了一个有趣的改进,形成了一套太赫兹脉冲焦线成像系统,在一定程度上也较好地缩短了成像耗时。图 2(a)展示了太赫兹脉冲焦线成像系统的光路图,利用柱透镜(CL1)将太赫兹光束汇聚成一条焦线照射样品,通过样品后的太赫兹焦线又经过一个球透镜(L2)和一个柱透镜(CL2)被准直为平行光。在探测光路中,探测光首先经过扩束,并与太赫兹光束形成非共线重合。在重合区域,探测晶体 ZnTe<sub>2</sub> 相对于探测光垂直放置,对太赫兹信号进行电光采样。最后,由 CMOS 摄像头获取探测光图像,进而提取太赫兹信号。此成像技术的独特之处在于,由于太赫兹光束与探测光非共线重合,不同重合区域对应着不同的时间延迟,因此利用此成像技术不需要对太赫兹信号进行时域扫描,可以直接从 CMOS 获取的图像中提取出太赫兹时域信号,进而缩短实验耗时。利用此系统, Yasui 等人对一个金属孔阵列样品进行了成像测试,如图 2(b)所示。样品分为四个区域,每个区域的孔阵列尺寸有所不同,样品以 1 mm/s 速度横向移动通过太赫兹焦线,图 2(b)展示了样品的太赫兹图像,波段位于 0.407 THz、0.815 THz、1.600 THz。可以看出,随着频率的增大,太赫兹图像的分辨率也逐渐升高,表现出了此成像技术的测量性能。当然,从太赫兹成像的结果不难看出,由于太赫兹波段的波长较长,一般所能达到的图像分辨率还是很低,同时由于用 CCD 或 CMOS 采集太赫兹图像,不能通过锁相技术进行滤波,因此所提取的太赫兹信号的信噪比较低,这些因素都限制了太赫兹脉冲焦平面成像技术的应用。



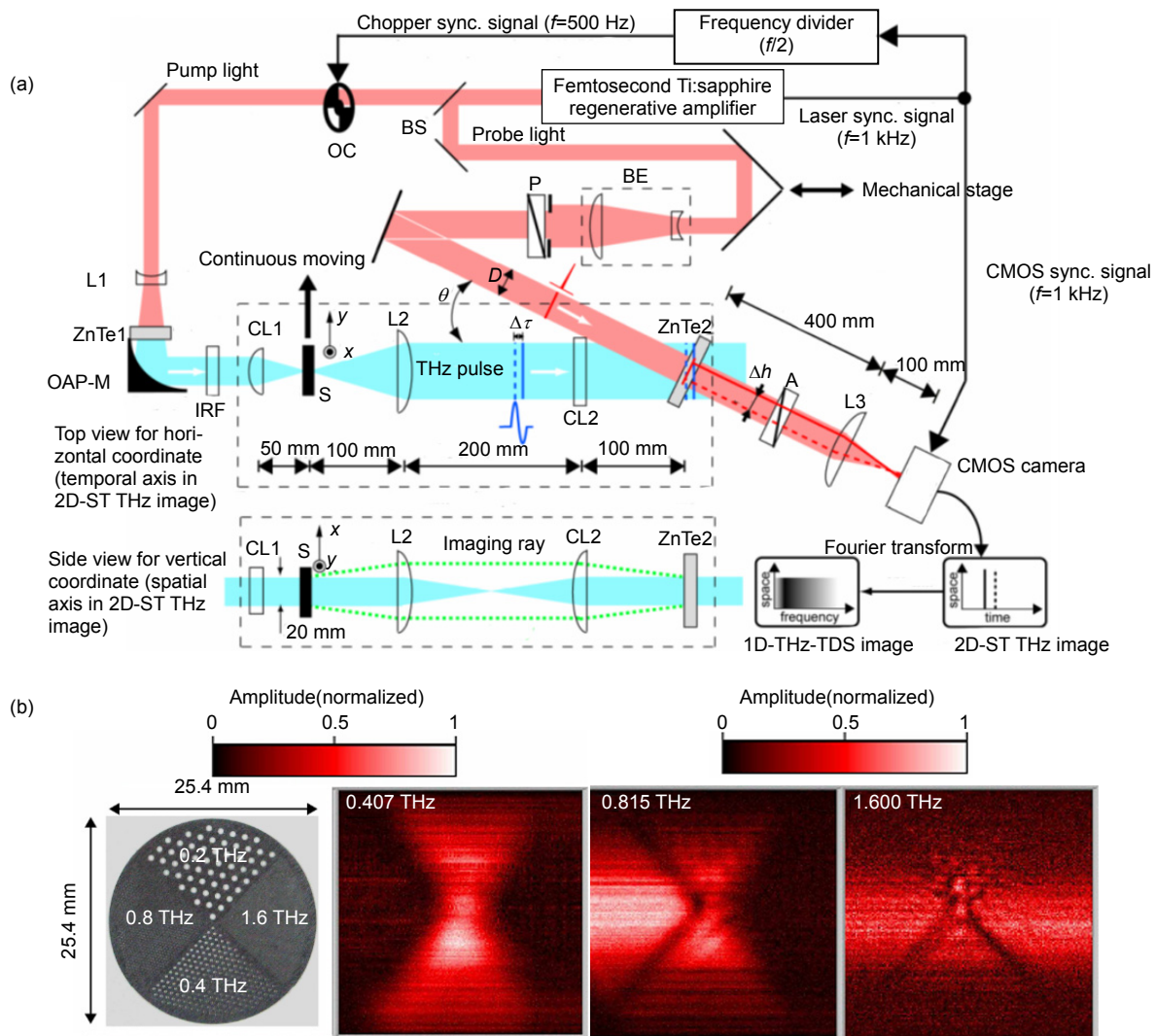


图2 太赫兹脉冲焦线成像<sup>[16]</sup>。(a) 太赫兹脉冲焦线成像系统;

(b) 金属孔阵列样品和样品的太赫兹图像, 频率范围位于 0.407 THz、0.815 THz、1.600 THz

Fig. 2 THz pulsed focal-line imaging<sup>[16]</sup>. (a) Scheme of a THz pulsed focal-line imaging system;

(b) Photo of a metal hole array and its THz images at 0.407 THz, 0.815 THz, 1.600 THz

### 2.3 太赫兹脉冲焦平面成像的性能提升

从 2009 年到 2010 年, 本科研团队尝试采用一系列技术对太赫兹脉冲焦平面成像进行性能改进<sup>[17-19]</sup>, 图 3(a)展示了改进后的太赫兹脉冲焦平面成像系统光路。1) 为了提升太赫兹成像的图像分辨率, 采用了准近场探测技术, 光路如图 3(b)所示<sup>[17]</sup>。将太赫兹光束与探测光束相对传输, 共同照射探测晶体, 探测光被晶体的左侧表面反射, 与太赫兹光束形成共线, 进而通过电光采样技术进行相干探测。采样此种测量方式, 可以将待测样品紧贴探测晶体放置, 当太赫兹光波通过样品后可以被立刻测量, 很大程度上避免了衍射效应对太赫兹成像的影响。由于太赫兹辐射处于亚毫米

波段, 此测量模式可以获取一部分太赫兹光波的近场信息, 因此使得图像分辨率得到很好地提升。利用此系统对金属孔阵列样品进行测量, 可以清晰地观测样品的形貌信息, 图像分辨率可以达到约 160  $\mu\text{m}$ 。2) 为了改进成像系统的信噪比, 提出了将差分电光探测技术引入成像系统, 如图 3(c)所示<sup>[18]</sup>。抛弃了利用正交偏振片对探测光进行检偏的方法, 将在太赫兹光谱技术中被广泛使用的差分电光探测技术用于成像系统。当对探测光进行检偏时, 使探测光连续通过 1/4 波片 (QWP) 和沃拉斯顿棱镜 (PBS), 将探测光分为两个光斑, 并由 CCD 同时获取。通过动态相减技术, 从两个探测光斑中同时提取太赫兹光场分布, 可以看出在相应像素位置上, 两个太赫兹信号具有相同的噪声浮

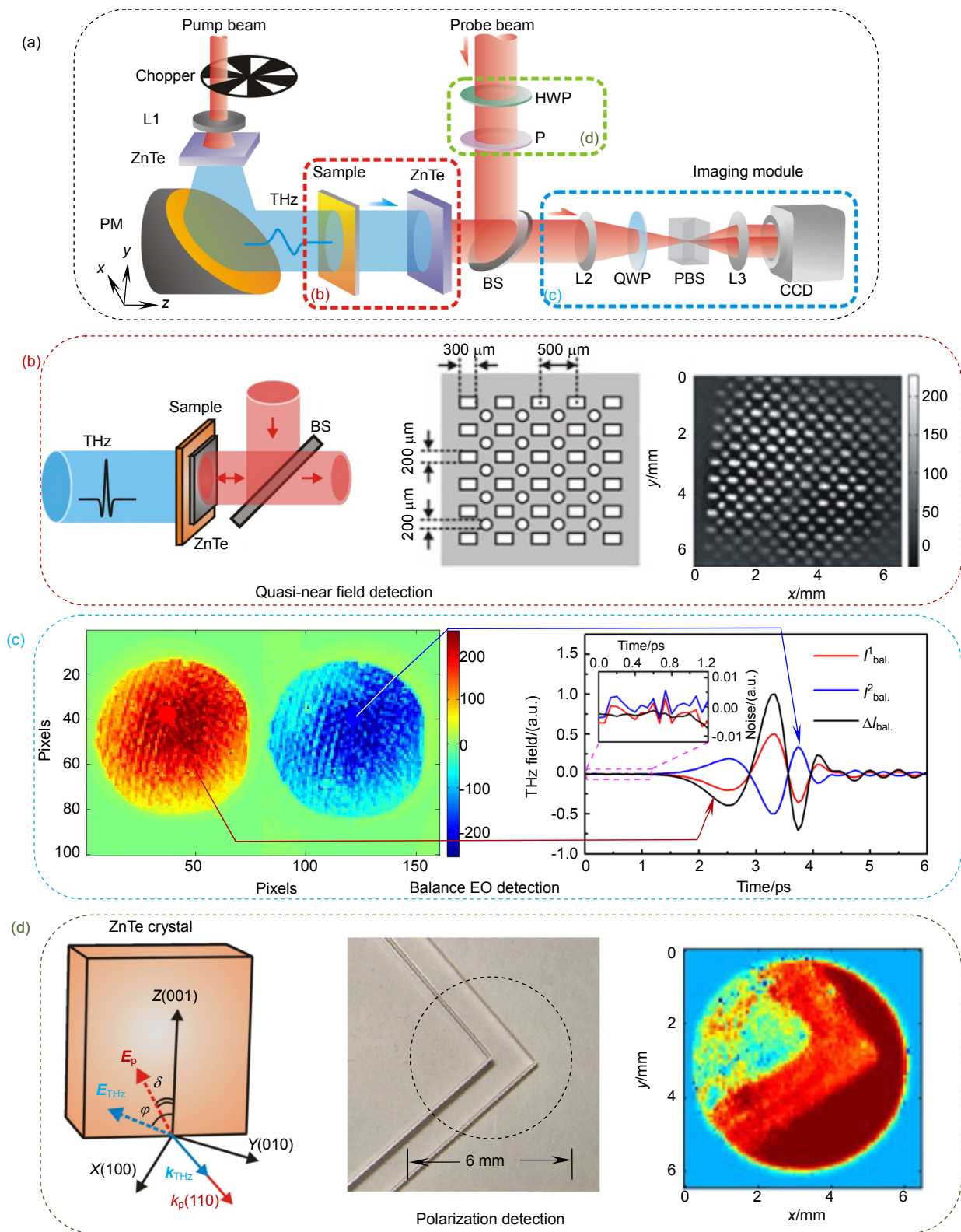


图3 太赫兹脉冲焦平面成像系统的改进<sup>[17-19]</sup>。(a) 改进后的太赫兹脉冲焦平面成像系统；

(b) 准近场探测技术；(c) 差分光电探测技术；(d) 偏振探测技术

Fig. 3 Improvement of a THz pulsed focal-plane imaging system<sup>[17-19]</sup>. (a) Improved THz pulsed focal-plane imaging system; (b) Quasi-near-field detection technique; (c) Balanced electro-optic detection technique; (d) Polarization detection technique

动和相反的信号极性,将两个太赫兹信号相减后,可以在有效压制噪声的同时将信号强度提高一倍。因此,利用此技术可以比正交偏振片检偏方法更好地滤除探测光背景强度,使得单像素太赫兹信号的信噪比可以达到约 20 dB。3) 为了提高成像系统的信息获取能力,通过改变探测光偏振态实现了对不同太赫兹偏振分量的高精度测量,如图 3(d)所示<sup>[19]</sup>。在传统太赫兹偏振检测过程中,多是采用旋转探测晶体,改变探测晶体晶向的方式对不同太赫兹偏振分量进行测量<sup>[20]</sup>,而这一方法在太赫兹脉冲焦平面成像中会引入很大的误差,影响成像质量。本团队首次提出了通过改变探测光偏振方向进行太赫兹偏振成像的方法,当探测光偏振态与探测晶体 $\langle 001 \rangle$ 轴平行或垂直时,水平太赫兹分量  $E_x$  被探测;当探测光偏振态与晶体 $\langle 001 \rangle$ 轴成  $45^\circ$  时,竖直太赫兹分量  $E_y$  被探测。在此原理的基础上,在探测光路中引入了  $1/2$  波片(HWP)和偏振片(P)对探测光偏振态进行调整,实现了太赫兹偏振成像。利用两个部分重叠放置的石英晶片作为样品检测成像系统性能,获取了样品的太赫兹偏振图像。可以看出,在两个晶片的重叠区域对太赫兹偏振态影响最大,所以图像强度响应最明显;在一个晶片的区域对太赫兹偏振态影响较小,图像强度响应较弱;在没有晶片区域对太赫兹偏振态没有影响,图像强度不发生变化。通过这一系列的技术革新,使得太赫兹脉冲焦平面成像具有了较好的分辨率和信噪比,并具有了偏振测量功能,很大程度上提升了此太赫兹成像技术的实用性。

#### 2.4 太赫兹脉冲焦平面显微成像

随着太赫兹脉冲焦平面成像技术的不断成熟,人们不断尝试将此成像技术的性能提升至极致。在 2011 年,日本京都大学的 Blanchard 等<sup>[21]</sup>将太赫兹脉冲焦平面成像的图像分辨率提升至  $14 \mu\text{m}$ ,达到了相应太赫兹波段(波长  $430 \mu\text{m}$ ,频率  $0.7 \text{ THz}$ )波长的  $1/30$ ,实现了太赫兹近场显微。如图 4(a)所示,在此系统中 Blanchard 等人仍然采用了准近场探测和差分光电探测的测量方式,特别之处在于所使用的探测晶体为  $20 \mu\text{m}$  厚的  $\text{LiNbO}_3$  晶体。此晶体具有较强的电光系数,可以更敏感地响应太赫兹信号。由于将晶体做得如此之薄,可以很大程度消除太赫兹光波在晶体内部的衍射对图像分辨率的影响。同时,在测量过程中,Blanchard 等人直接将待测样品加工到了探测晶体表面,进一步消除了太赫兹光波透过样品后的衍射影响。还采用了倾斜激光脉冲照射  $\text{LiNbO}_3$  棱镜的方法,

产生了强度达到  $200 \text{ kV/cm}$  的太赫兹辐射,以提高太赫兹图像的对比度。他们选择了一个间距是  $20 \mu\text{m}$  的双狭缝金属模板进行成像测量,检测成像系统性能,样品的光学和  $0.7 \text{ THz}$  太赫兹图像如图 4(b)所示。从太赫兹图像中可以清晰地观测到样品的形貌,其与光学图像效果几乎一致。在图 4(b)中的虚线位置提取一条太赫兹强度包络曲线,其分布如图 4(c)所示,其与相应的光学强度包络曲线基本一致。根据太赫兹强度分布的  $10\% \sim 90\%$  范围评估成像分辨率,可以得到  $14 \mu\text{m}$  的分辨率,这是目前太赫兹脉冲焦平面成像可以达到的最高分辨率。此工作也证明了,利用太赫兹脉冲焦平面成像系统可以对微米尺度的样品进行检测,这无疑对开拓太赫兹成像技术的应用领域具有很大的价值。

#### 2.5 太赫兹脉冲焦平面成像的光场矢量表征

随着人们对于太赫兹成像测试需求的不断提高,对于太赫兹脉冲焦平面成像系统的性能又有了新的改进。在 2014 年,本科研团队尝试将 $\langle 100 \rangle$ 晶向的  $\text{ZnTe}$  晶体引入成像系统,作为探测晶体使用,成功实现了对太赫兹光场的矢量表征<sup>[22]</sup>。图 5(a)展示了相应的成像系统,不同于传统的 $\langle 110 \rangle \text{ZnTe}$  晶体, $\langle 100 \rangle \text{ZnTe}$  晶体仅对太赫兹光场中的纵向分量  $E_z$  产生响应,因此两种晶体相互配合可以对任意太赫兹光场的矢量分布特性进行表征。为了检测此成像系统的性能,利用高阻硅透镜对太赫兹光波进行聚焦,并观测了在汇聚过程中  $E_z$  的复振幅变化。图 5(b)展示了线偏振太赫兹光场在聚焦过程中  $E_z$  振幅与相位的演变,其偏振方向沿  $x$  轴,可以看出  $E_z$  振幅呈现了沿  $y$  轴的左右对称双极值分布,与偶极子的电磁辐射类似, $E_z$  相位呈现了左右反对称分布特征,在左右对应区域存在  $\pi$  的相位差。这表明在太赫兹光波聚焦过程中,仅在  $x-z$  平面产生  $E_z$  分量,并且在  $y$  轴两侧的  $E_z$  分量相向传播,在光轴区域产生了相干相消,最终形成这样的特殊分布。在此基础上,本团队又测量了左旋圆偏振太赫兹光场在聚焦过程中  $E_z$  的演变,如图 5(c)所示。此时,在  $x-z$  和  $y-z$  平面上都产生了  $E_z$  分量,二者相差  $\pi/2$  的相位并且相互干涉,形成了涡旋形态的分布特征。 $E_z$  振幅呈现了“甜甜圈”分布模式, $E_z$  相位呈现了顺时针螺旋变化趋势,并且在焦平面前后  $E_z$  相位的扭转方向发生了明显的反转,这些特征与之前观测的太赫兹涡旋光束衍射特性极为相似<sup>[23]</sup>。至此为止,可以说太赫兹脉冲焦平面成像已经拥有了较为成熟的检测功能,可



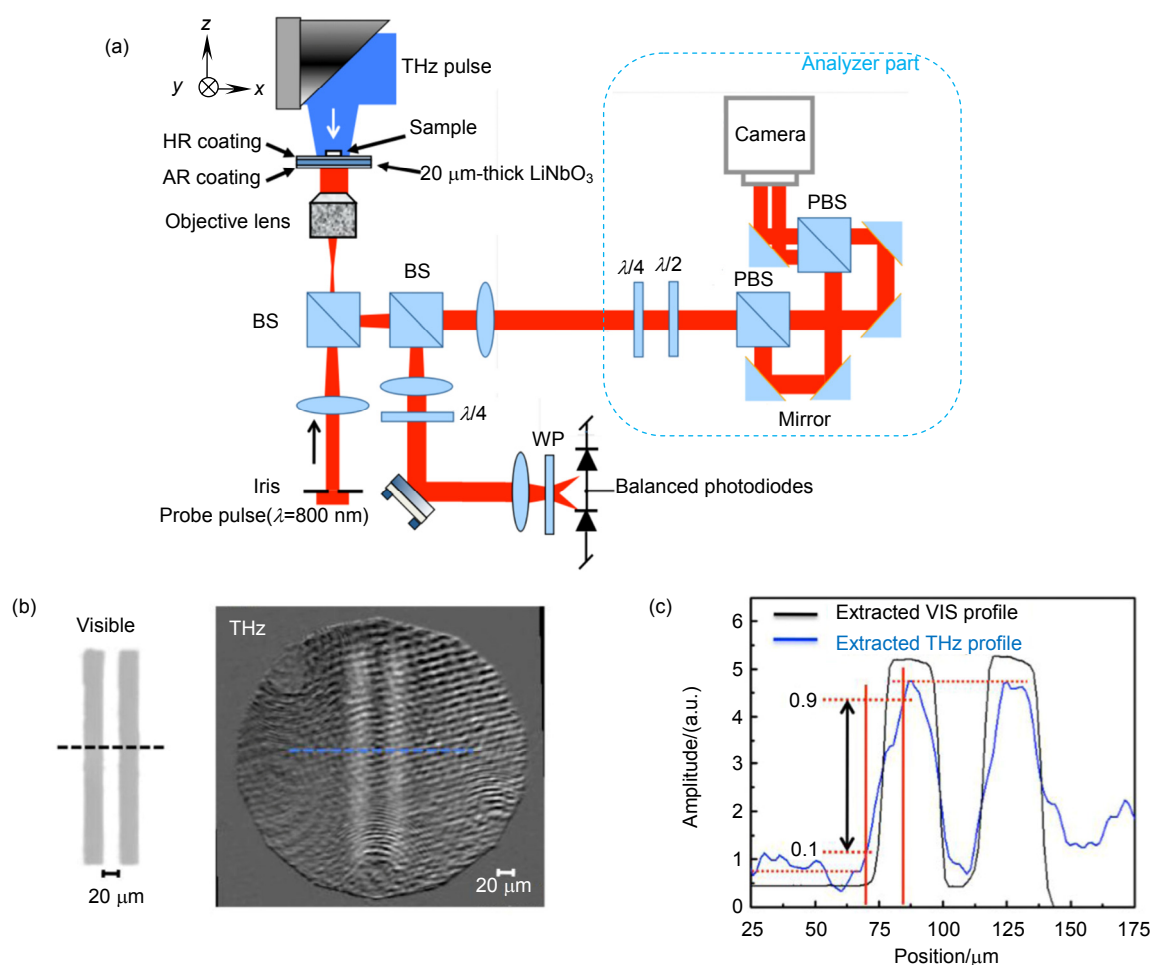


图 4 太赫兹脉冲焦平面显微成像<sup>[21]</sup>。(a) 太赫兹脉冲焦平面显微成像系统；(b) 双缝金属模板的光学和太赫兹图像；(c) 在(b)中虚线位置处提取的太赫兹强度包络曲线

Fig. 4 THz pulsed focal-plane microscopy<sup>[21]</sup>. (a) Scheme of a THz pulsed focal-plane microscopy system; (b) Visible and THz images of a double slit metallic mask; (c) THz intensity profile curve extracted along the dashed line in (b)

以对太赫兹二维光场的几乎全部信息进行高精度测量，包括振幅、相位、频率、偏振，在很多工业和基础研究领域具有较好的应用价值。

### 3 太赫兹脉冲焦平面成像的应用

#### 3.1 光谱识别检测

随着太赫兹脉冲焦平面成像的功能逐步完善，它的应用价值也逐渐显现，这里仅综述一些有代表性的工作。2006年，美国伦斯勒理工大学的 Zhong 等<sup>[24]</sup>利用反射式太赫兹脉冲焦平面成像系统对五种化学物质进行了光谱识别检测，如图 6(a)所示。在此工作中，Zhong 等人为了提高成像系统的实用性，采用了反射测量模式，测量了由五种化学物质(2,4-DNT、可可碱、RDX、谷氨酸和玻璃样品)反射的太赫兹二维图像，图 6(b)展示了五种物质的光学照片和太赫兹图像，波段

分别位于 0.82 THz、1.08 THz、1.21 THz。由于不同化学物质对于太赫兹辐射具有不同的吸收特性，所以样品在不同波段的太赫兹图像有不同的明暗响应。在 0.82 THz 图像中，爆炸物 RDX 的太赫兹图像有更强的亮度；在 1.08 THz 图像中，二硝基甲苯 2,4-DNT 的太赫兹图像有更强的亮度；在 1.21 THz 图像中，谷氨酸的太赫兹图像相比于其它物质有更强反映。此工作成功验证了太赫兹脉冲焦平面成像对物质进行光谱识别测量的可行性，获得了业内的广泛关注。2010年，日本大阪大学 Schirmer 等<sup>[25]</sup>利用太赫兹脉冲焦线成像系统对人类牙齿切片样品进行了检测，证明了此成像技术在生物检测中的应用潜力。如图 6(c)所示，Schirmer 等人采用了透射测量模式，将样品置于太赫兹焦线位置，并以 0.1 mm/s 的速度横向扫描样品进行成像测量。图 6(d)展示了人类牙齿切片样品的光学图像和位于

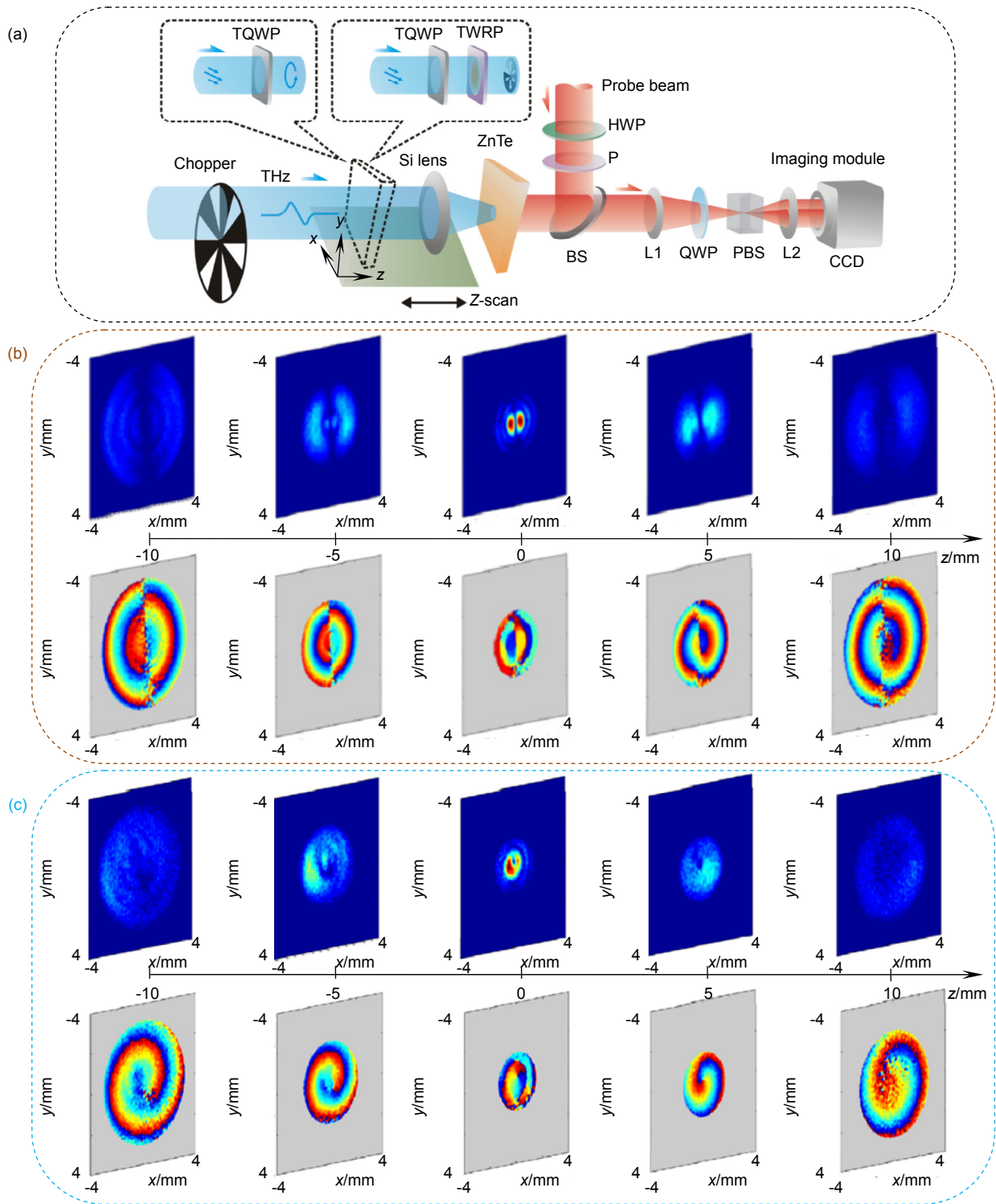


图 5 太赫兹脉冲焦平面成像实现对矢量光场测量<sup>[22]</sup>。(a) 太赫兹脉冲焦平面成像系统，探测晶体选用了<100>ZnTe；(b) 线偏振汇聚太赫兹光场，其  $E_z$  分量在传输过程中振幅和相位的演变；(c) 左旋圆偏振汇聚太赫兹光场，其  $E_z$  分量的复振幅演化过程

Fig. 5 Vectorial measurement of a THz field by THz pulsed focal-plane imaging<sup>[22]</sup>. (a) THz pulsed focal-plane imaging system in which a <100> ZnTe is selected as the sensor crystal; (b) Evolutions of the  $E_z$  amplitude and phase for a converging linearly polarized THz field and (c) evolution of the  $E_z$  complex field for a focused left circularly polarized THz field



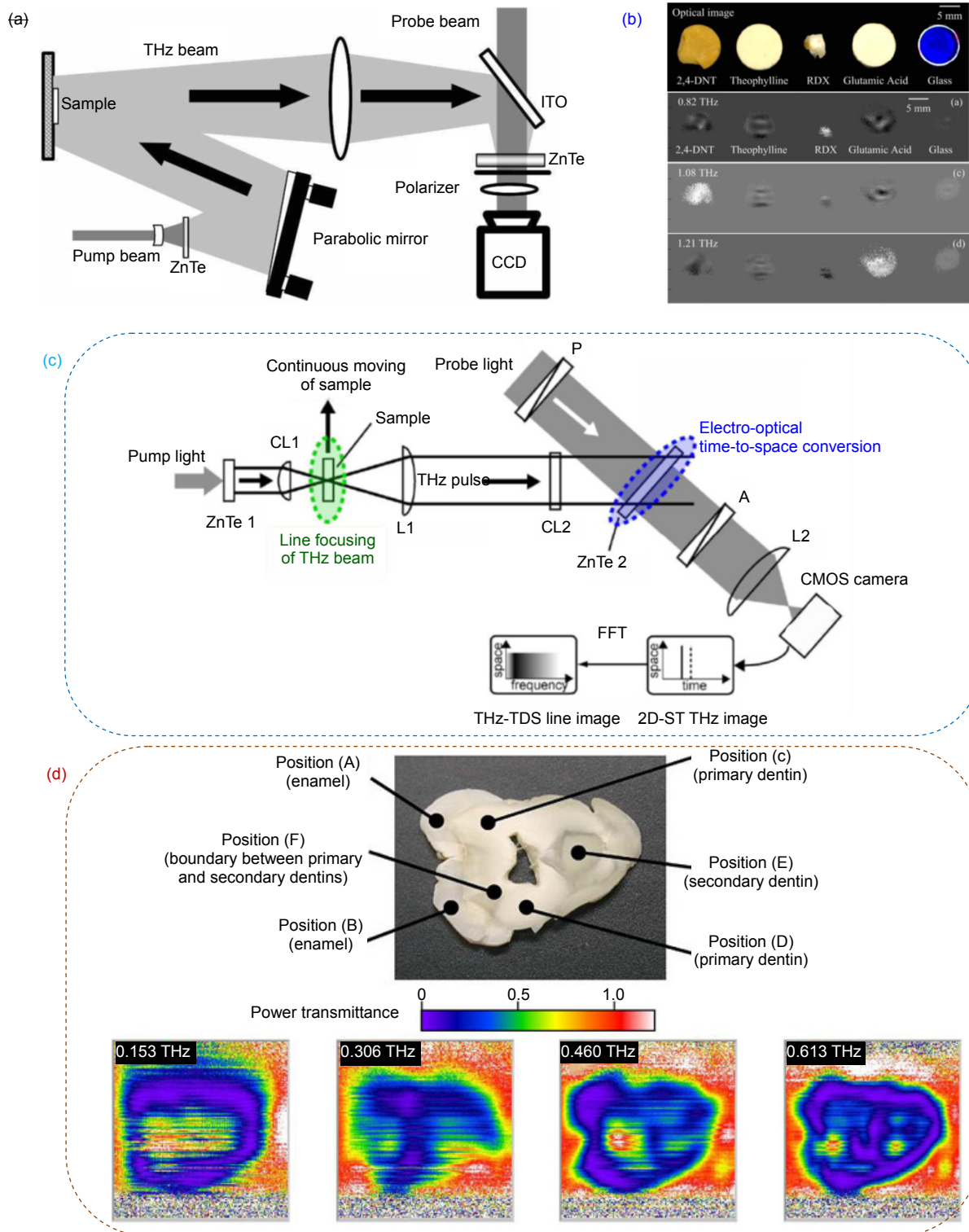


图 6 太赫兹脉冲焦平面成像的光谱识别检测<sup>[24-25]</sup>。(a) 利用太赫兹脉冲焦平面反射成像系统对化学药品的检测;

(b) 2,4-DNT、可可碱、RDX、谷氨酸和玻璃的光学图像以及太赫兹图像;

(c) 利用太赫兹脉冲焦线成像系统对生物切片的检测; (d) 人类牙齿切片样品的光学图像以及太赫兹图像

Fig. 6 Spectroscopic identification by THz pulsed focal-plane imaging<sup>[24-25]</sup>. (a) Inspection of different chemicals by reflective THz pulsed focal-plane imaging; (b) Visible and THz images of 2, 4-DNT, theophylline, RDX, glutamic acid, and glass samples; (c) Inspection to biological tissues by THz pulsed focal-line imaging; (d) Visible and THz images of a human tooth slice

0.153 THz、0.306 THz、0.460 THz、0.613 THz 的太赫兹光谱图像。可以看出,从太赫兹图像中可以较清晰地观测到牙齿切片的形貌分布。并且,在低频波段,牙齿切片的外部壳层对太赫兹光波的吸收更为强烈;在高频波段,牙齿切片的外部壳层和内部壳层对太赫兹光波的吸收没有明显差别。此工作表明了在不同波段生物样品有着不同的太赫兹光谱响应,证明了此成像技术在医学检测中的应用前景。除此之外,还有很多工作涉足于利用太赫兹脉冲焦平面成像对物质进行光谱检测,例如 2005 年,尼康公司的 Usami 等<sup>[26]</sup>利用透射式太赫兹脉冲焦平面成像测量了水杨酸、生物素和葡萄糖的太赫兹光谱响应;2009 年,美国麻省理工学院的 Wu 等<sup>[27]</sup>利用改进的太赫兹脉冲焦平面成像系统观测了  $\text{LiNbO}_3$  晶体中太赫兹辐射的产生与传输过程,并测量了太赫兹光波通过二维平行波导后的频谱响应。这些工作都为太赫兹脉冲焦平面成像在光谱识别检测中的应用发展提供了重要的助力,使这项成像技术的应用价值逐渐被人们所关注。

### 3.2 超表面器件的功能表征

随着太赫兹技术的发展,人们对于太赫兹系统的小型化、集成化、多功能化提出了越来越高的要求,传统太赫兹系统过大的体积和繁杂的光路已经逐渐成为了阻碍太赫兹技术应用的瓶颈。2011 年,美国哈佛大学的 Yu 等<sup>[28]</sup>首次提出了超表面的概念,设计并制备了亚波长金属天线器件,实现了对可见光场的特殊调制作用。由于此类元件尺寸远远小于传统光学元件,并且通过适当的设计可以实现不同的功能,迅速引起了光学领域的普遍关注。本科研团队于 2013 年首次将超表面技术引入太赫兹领域,设计了太赫兹波段的 V 型天线,实现了对太赫兹光场的纯相位调制,并制备了厚度仅为波长  $1/4000$  的太赫兹超表面透镜。此器件的概念如图 7(a1)所示,太赫兹光波通过超表面透镜后可以被很好地聚焦和成像,而太赫兹脉冲焦平面成像系统为这一器件的功能表征提供非常适合的平台<sup>[29]</sup>。图 7(a2)展示了用于成像的金属镂空字母“C”、“N”、“U”,每一个字母的尺寸约为 4 mm。图 7(a3)展示了利用此透镜进行的成像效果,可以很清晰地观测出每个字母的形貌,验证了此透镜具有良好的成像性能。此工作得到了太赫兹领域同行的普遍认可。在此工作基础上,本团队又研发出了一系列太赫兹波段的超表面衍射器件,并利用太赫兹脉冲焦平面成像进行功能验证。2015 年,本团队利用棒型天线实现了对太赫兹

光波的偏振选择性响应,以此为基础设计制备了太赫兹光子霍尔透镜,完成了对左旋和右旋入射光的空间分离聚焦,如图 7(b1)所示<sup>[30]</sup>。当入射光为左旋/右旋时,由棒型天线的正交极化会激发出相应的右旋/左旋太赫兹光波,并加载相应的 Pancharatnam-Berry 几何相位,进而实现空间分离聚焦。图 7(b2)展示了当入射光为右旋圆偏振时,出射的聚焦光波出现在  $x-y$  和  $x-z$  平面的右侧;当入射光为左旋圆偏振时,出射的聚焦光波出现在  $x-y$  和  $x-z$  平面的左侧。2016 年,本团队利用 C 型天线设计并实现了太赫兹环形艾里光束调制器,器件的光学显微图像如图 7(c1)所示<sup>[31]</sup>。当太赫兹光波通过调制器后,正交极化的透射光形成了环形艾里光束,由于环形艾里光束具有向内加速传输特性,在传输过程中会产生自聚焦效应。图 7(c2)展示了透射的太赫兹环形艾里光束在  $x-z$  平面的传输过程,清晰地显示了太赫兹光束的自聚焦过程。图 7(c3)展示了在太赫兹环形艾里光束传输的不同位置获得的光场分布。可以看出在聚焦之前,太赫兹光场呈现环形分布,这是典型的环形艾里光束分布特征;在聚焦之后,太赫兹光场呈现中心主光斑和周围环形旁瓣的分布特点,这与贝塞尔光束的光场分布十分类似。2016 年,本团队利用 C 型天线设计制备了太赫兹多波长全息图,如图 7(d1)所示<sup>[32]</sup>。此工作的理论基础在于,对于同一个 C 型天线,不同频段的太赫兹光波具有不同的相位调制效果。因此通过适当的设计可以形成一个频分复用全息图,当宽带太赫兹脉冲入射器件时,不同频段的透射图像会呈现不同的光场分布。图 7(d2)和图 7(d3)分别展示了当太赫兹脉冲入射全息图后,出射的 0.50 THz 和 0.63 THz 的图像分布,可以看出 0.50 THz 图像呈现了字母“C”的形态,而 0.63 THz 图像呈现了字母“N”的形态。虽然存在着轻微的信号串扰,但是“C”和“N”的形状都可以明确地识别。以上三个工作分别将太赫兹超表面器件扩展出了偏振选择响应、特殊光束产生、频分复用的功能,在研发这些器件的过程中,太赫兹脉冲焦平面成像作为重要的表征手段,起到了关键的作用,这些工作都极大地推动了多功能太赫兹器件与系统的发展。除此之外,国内很多知名课题组也与本团队合作,研发了各种太赫兹波段的衍射光学元件。例如,2017 年南京大学陆延青和胡伟团队与本团队合作研发了基于高双折射液晶分子的太赫兹涡旋光束调制器<sup>[33]</sup>;2019 年复旦大学周磊和何琼团队与本团队合作研发了针对圆偏振太赫兹光波

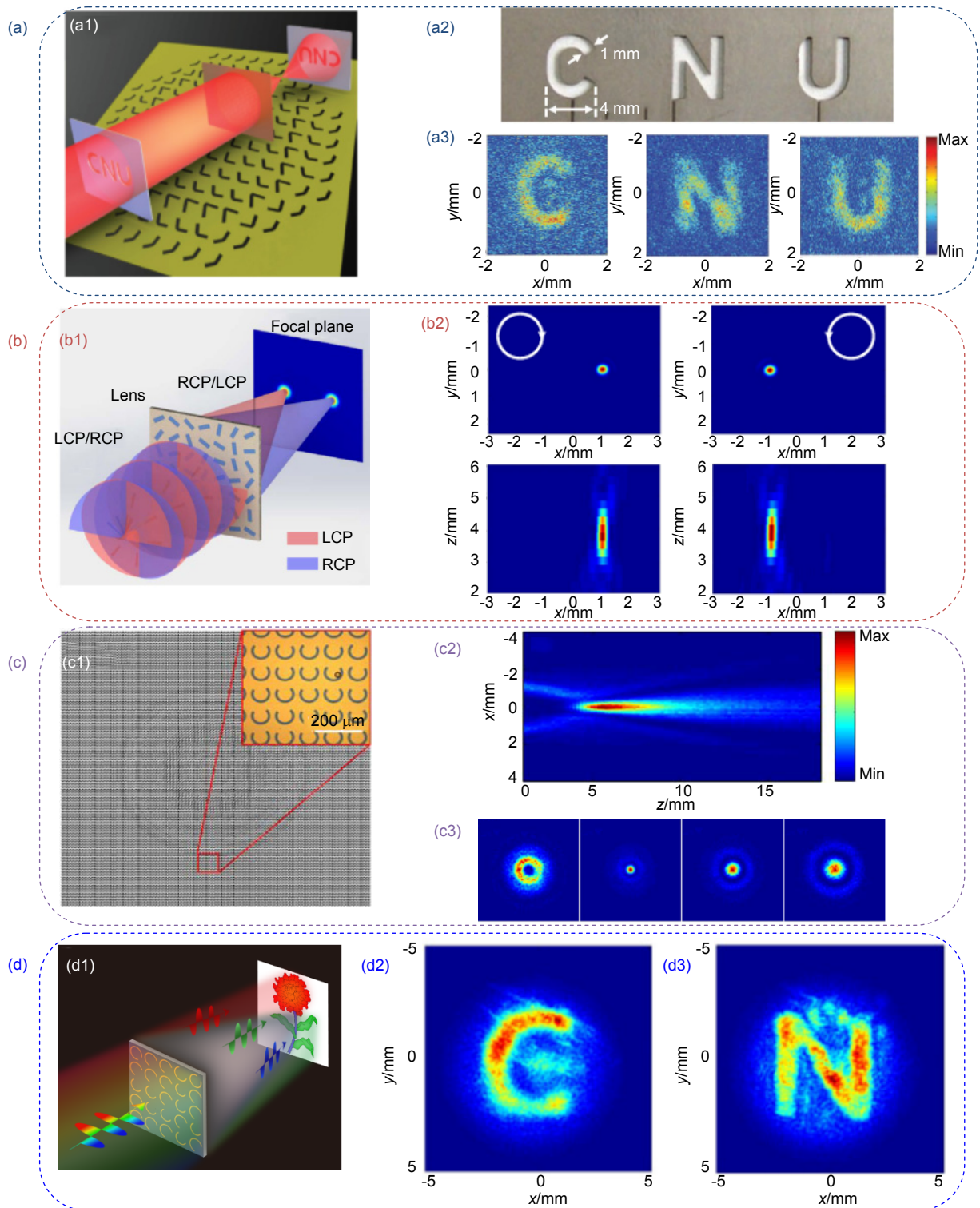


图7 利用太赫兹脉冲焦平面成像对超表面器件进行功能表征<sup>[29-32]</sup>。

- (a) 太赫兹超表面透镜的成像功能表征; (b) 太赫兹超表面光子霍尔器件的偏振选择性响应表征;  
 (c) 太赫兹超表面环形艾里光束调制器功能表征; (d) 太赫兹超表面多波长全息图功能表征

Fig. 7 Function characterization of metasurface elements by THz pulsed focal-plane imaging<sup>[29-32]</sup>.

- (a) Imaging function characterization of a THz metasurface lens;  
 (b) Polarization-dependent response of a THz metasurface photonic Hall element;  
 (c) Function characterization of a THz metasurface ring Airy beam modulator;  
 (d) Function characterization of a wavelength de-multiplexing THz metasurface hologram



的高效超表面器件,衍射效率可高达 90%<sup>[34]</sup>。在这些工作的完成过程中,太赫兹脉冲焦平面成像都起到了重要的表征功能。

### 3.3 太赫兹特殊光束的矢量表征

随着人们对于太赫兹光子学以及相关技术的理解逐步深入,研究的热点已经逐渐触及到了太赫兹波段的各种特殊光束。所谓特殊光束,是指相对于普通的平面光波、球面光波等,这些光束具有独特的强度及相位分布,并且这些独特性质使得这些光束具有明显的应用价值。例如,涡旋光束具有环形振幅和螺旋相位<sup>[35]</sup>,可以作为载波在光通信领域得到应用;贝塞尔光束在很长的一段无衍射区域内保持光场分布的稳定性<sup>[36]</sup>,可以在光学加工技术、光学成像中得到应用;瓶子光束具有一个三维光学势阱<sup>[37]</sup>,在光镊、粒子操控等领域应用价值巨大。

从 2016 年到 2018 年,本科研团队利用太赫兹脉冲焦平面成像的矢量表征功能,研究了一系列太赫兹波段特殊光束的衍射特性,包括太赫兹涡旋光束、太赫兹贝塞尔光束、太赫兹瓶子光束。在 2016 年,本团队利用聚乳酸材料加工了 0.62 THz 波段的涡旋相位板,通过涡旋相位板与硅透镜的共同调制产生了汇聚的太赫兹涡旋光束,并利用太赫兹脉冲焦平面成像测量了太赫兹涡旋光束在焦点附近的横向电场  $E_x$  与纵向电场  $E_z$  分布<sup>[38]</sup>。图 8(a1)和图 8(a3)展示了线偏振聚焦太赫兹涡旋光束的  $E_x$  振幅和相位分布,可以看出由于存在中心的相位奇点,  $E_x$  振幅中心出现了强度暗点,表现出典型的“甜甜圈”分布模式;  $E_x$  相位展现了明显的螺旋变化趋势,由于涡旋相位板的拓扑荷数为 1,因此相位变化范围从 0 到  $2\pi$ 。图 8(a2)和图 8(a4)展示了  $E_z$  的振幅和相位分布,  $E_z$  振幅呈现了中心主光斑与两侧弯月旁瓣的分布模式,  $E_z$  相位呈现了  $180^\circ$  的旋转对称分布,在光轴附近  $E_z$  相位呈现平面,在光轴两侧  $E_z$  相位出现两个相位奇点。这一现象的解释为,对于线偏振太赫兹汇聚光波,其  $E_z$  分布应如图 5(b)所示,然而由于涡旋相位调制的引入,抵消了原本在光轴位置的相干相消,呈现了如此复杂特殊的分布模式。在此工作基础上,本团队于 2017 年利用聚四氟乙烯轴棱锥产生了太赫兹波段的贝塞尔光束,并观测了太赫兹贝塞尔光束矢量光场的无衍射特性<sup>[39]</sup>。图 8(b1)和图 8(b3)展示了利用底角为  $30^\circ$  的轴棱锥所产生 0.6 THz 线偏振贝塞尔光束的  $E_x$  振幅与相位分布,在  $x-y$  平面,  $E_x$  振幅呈现了典型的 0 阶贝塞尔函数分布特征,包括中心

主光斑与周围环形旁瓣,在  $x-z$  平面,  $E_x$  振幅呈现了 24 mm 范围内的无衍射传输特性,在此传输范围内太赫兹光斑的强度分布几乎没有发生变化;在  $x-y$  平面,  $E_x$  相位呈现了同心圆分布模式,并且在相邻圆区域边界处存在  $\pi$  的相位跳变,在  $x-z$  平面,在光轴附近  $E_x$  相位表现出了线性变化的 Gouy 相移,这些现象与可见光波段的贝塞尔光束是一致的<sup>[40]</sup>。图 8(b2)和图 8(b4)展示了  $E_z$  的振幅和相位分布,与图 5(b)所展示的现象类似,  $E_z$  振幅也表现出了双极性分布,在光轴处存在强度暗点,  $E_z$  相位表现出相对于  $y$  轴左右反对称分布,左右相对位置存在  $\pi$  的相位差。同时,  $E_z$  分量也展示了明显的无衍射特性,在 24 mm 的传输区域内,  $E_z$  振幅表现出了稳定的场分布。随着工作的深入,在 2018 年本团队又利用聚四氟乙烯轴棱锥与硅透镜相结合的方式,产生了太赫兹波段的瓶子光束,并观测了其光场演化过程<sup>[41]</sup>。图 8(c1)和图 8(c2)展示了太赫兹光场在不同传播位置  $z=-4.5$  mm、0 mm、4.5 mm 处的  $E_x$  振幅与相位分布,以及太赫兹光场在  $x-z$  平面上的  $E_x$  振幅与相位演化过程。可以看出,在瓶子光束的两端,  $E_x$  振幅都呈现了类似贝塞尔光束的分布模式,在瓶子光束的中部,  $E_x$  振幅呈现了光环分布,在整体上形成了一个典型的三维光学势阱。根据  $E_x$  相位分布,可以很好地理解瓶子光束的形成过程。在瓶子光束的前后两端,  $E_x$  相位分别表现出了汇聚和发散的趋势,在瓶子光束的中部,  $E_x$  相位表现出了汇聚的焦点。这意味着,在太赫兹光束通过轴棱锥后形成了沿不同方向折射的平面波,又经过透镜的汇聚,在透镜焦距位置形成了光环分布,而在焦点的前后位置由于干涉效应形成了类似贝塞尔光束的分布模式。在此工作中,同样测量了太赫兹瓶子光束的  $E_z$  分布,  $E_z$  的振幅分布如图 8(c3)所示。可以看出,在瓶子光束的前后两端,  $E_z$  振幅都表现出了离轴双极性分布,与图 8(b2)十分类似,在瓶子光束的中部,  $E_z$  振幅又呈现了左右对称的双弯月分布特征。由于这里太赫兹光场的偏振态是线偏振,在  $y-z$  平面上不存在  $E_z$  分量,所以呈现了这样的分布模式。

总体来说,由于太赫兹特殊光束的独特衍射性质,研究这些光束对于开发新型太赫兹光谱与成像系统具有很好的推动意义,目前太赫兹特殊光束已经在太赫兹成像<sup>[42]</sup>、太赫兹场进行粒子加速<sup>[43]</sup>等领域得到了很好的应用。利用太赫兹脉冲焦平面成像,可以对太赫兹特殊光束的衍射特性进行全面而准确地表征,对于

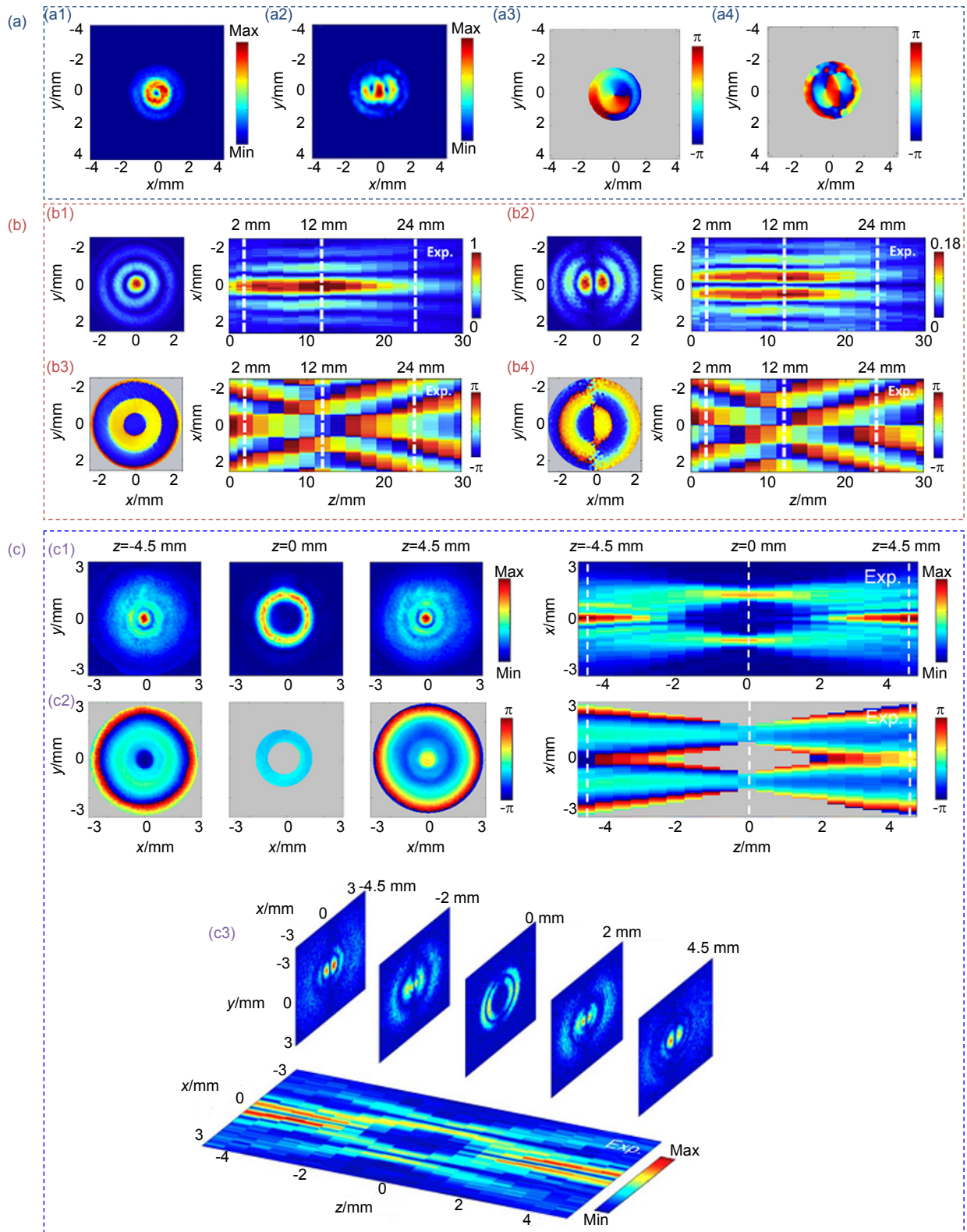


图 8 利用太赫兹脉冲焦平面成像对太赫兹特殊光束进行矢量表征<sup>[38-39, 41]</sup>。

(a) 太赫兹涡旋光束的矢量表征; (b) 太赫兹贝塞尔光束的矢量表征; (c) 太赫兹瓶子光束的矢量表征

Fig. 8 Vectorial characterization of THz special beams by THz pulsed focal-plane imaging<sup>[38-39, 41]</sup>. (a) Vectorial characterization of a THz vortex beam; (b) Vectorial characterization of a THz Bessel beam; (c) Vectorial characterization of a THz bottle beam

推进太赫兹特殊光束的研究与应用意义重大。

### 3.4 太赫兹表面波的观测

随着光学技术的不断发展，人们对于集成光学系统的需求越来越大，如果可以研制出类似于集成电路的“集成光学芯片”将极大地推进光学信息技术、光学检测技术等领域的发展，表面等离子体器件的问世为研发光学芯片提供了可能的思路。所谓表面等离子体器件，是指在金属或半导体表面加工亚波长缝槽结构，当光波入射结构时，通过结构散射实现波矢匹配，进而形成沿器件表面传输的电磁波<sup>[44]</sup>。这类器件的优势在于，可以通过适当设计表面结构对表面电磁波进行调控，进而实现通信、传感、信息处理等各种功能。在太赫兹波段，表面等离子体器件的研究也已经成为了一个重要的发展分支，有众多国内外的科研团队投身其中<sup>[45-46]</sup>。在表征表面等离子体器件的功能时，需要对表面电磁波的传输过程进行测定，而由于表面电磁波的偏振是垂直于器件表面的，利用太赫兹脉冲焦平

面成像的矢量检测功能正好可以为这种测量需求提供可靠的技术手段，本科研团队也开展了相关的研究工作。在2016年，本团队利用太赫兹脉冲焦平面成像对金属亚波长结构所激发的太赫兹表面波进行了测定，记录并分析了太赫兹表面波的传输过程<sup>[47]</sup>。如图9(a1)所示，在厚度为150 μm的钢板上加工了一个宽度为270 μm、半径为6 mm的半环狭缝。当偏振沿着y方向的太赫兹波入射结构时，会沿着半环边缘激发太赫兹表面波，并在钢板表面传输。根据费马原理，所激发的太赫兹表面波将经历一个汇聚过程。图9(a2)和图9(a3)分别展示了在时间延迟为1.07 ps和4.27 ps时，通过太赫兹脉冲焦平面成像所记录的太赫兹表面波传输过程，可以看出太赫兹表面波成弯月分布，并随着时间延迟呈现汇聚趋势，与理论预测一致。通过记录一系列太赫兹表面波的时域图像，并进行傅里叶变换，观测其频域分布模式。图9(a4)、图9(a5)、图9(a6)分别展示了0.44 THz表面波的振幅、相位和实部分布图像，可以看出这些图像清晰地展示了太赫兹表面波的

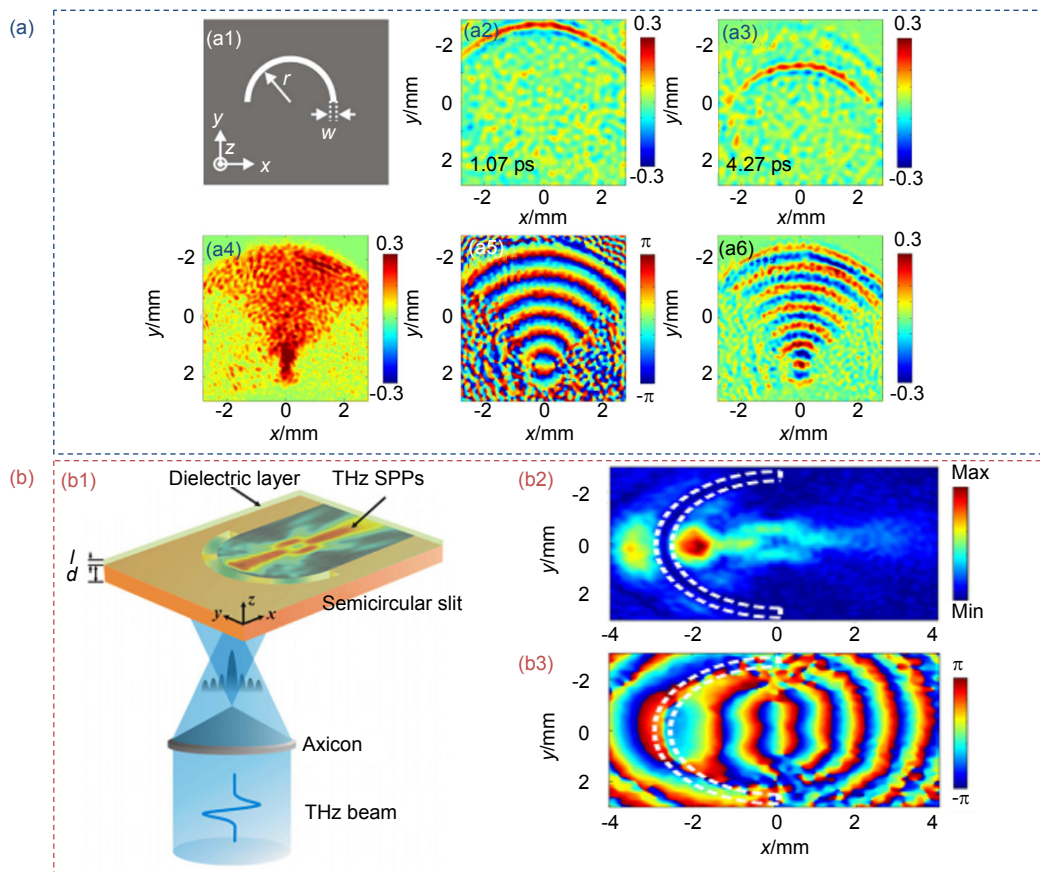


图9 利用太赫兹脉冲焦平面成像对太赫兹表面波进行表征<sup>[47-48]</sup>。

(a) 太赫兹表面汇聚光束的表征；(b) 太赫兹表面瓶子光束的表征

Fig. 9 Characterization of THz surface waves by THz pulsed focal-plane imaging<sup>[47-48]</sup>.

(a) Characterization of a THz surface converging beam; (b) Characterization of a THz surface bottle beam



汇聚过程,证明了利用太赫兹脉冲焦平面成像对太赫兹表面波进行测量的可行性。在此工作的基础上,本团队于2019年通过轴棱锥与金属半环狭缝配合的方式,实现了太赫兹表面瓶子光束,并利用太赫兹脉冲焦平面成像进行了测定<sup>[48]</sup>。如图9(b1)所示,当太赫兹光波入射轴棱锥时会形成沿不同方向折射的平面波,这些平面波照射金属半环狭缝激发太赫兹表面波,太赫兹表面波在汇聚的过程中也会携带入射光波的相位,最终在金属表面形成二维瓶子光束,这一过程与利用轴棱锥和硅透镜形成自由空间的太赫兹瓶子光束是一致的。图9(b2)和图9(b3)展示了0.33 THz太赫兹表面瓶子光束的振幅与相位分布,可以看出其振幅形成了二维暗焦点区域,其相位展示了太赫兹表面波汇聚成两个焦点并继续发散传播的过程。此工作证明了利用传统光学元件与表面等离子体器件配合的方式可以有效地操控表面波的传输模式,对于开发新型表面等离子体器件具有重要价值。

除了以上综述的应用领域,太赫兹脉冲焦平面成像还在其它不同领域得到了应用,例如日本滨松公司的Yasuda等<sup>[49]</sup>利用太赫兹脉冲焦平面成像观测了水滴下落的过程,证明了此成像技术可以对物体的实时运动进行测定;首都师范大学的Zhang等<sup>[50]</sup>利用反射太赫兹脉冲焦平面成像对隐蔽在包装袋内的玩具手枪进行了检测,证明了此成像技术有用于安全检查的可能;法国波尔多大学的Abraham等<sup>[51]</sup>利用太赫兹脉冲焦平面成像系统与Hartmann传感器配合对太赫兹波前进行了测定;本团队也曾利用太赫兹脉冲焦平面成像观测了太赫兹金属共轴波导的传输模式<sup>[52]</sup>以及自由空间中聚焦太赫兹光束的Gouy相移演变过程<sup>[53]</sup>。总体来说,太赫兹脉冲焦平面成像从1996年诞生至今,经历了一个较为迅速的发展过程,并且其应用价值已经在多个工业和基础研究领域得到了初步体现。

## 4 目前存在的问题

必须承认,目前的太赫兹脉冲焦平面成像还存在着较大的发展空间。首先,由于太赫兹脉冲焦平面成像系统无法利用锁相技术进行滤波,其单像素太赫兹信号的信噪比始终无法和传统的太赫兹时域光谱技术相媲美,好在随着一些高非线性系数的晶体被逐步引入太赫兹领域(例如LiNbO<sub>3</sub>、DAST、DSTM等),可以产生较强的太赫兹辐射源,在一定程度上缓解了太赫兹成像系统的信噪比需求<sup>[21, 54-55]</sup>;其次,太赫兹脉冲焦平面成像系统的成像区域受限于探测晶体的面积,

目前多采用ZnTe、GaP、LiNbO<sub>3</sub>等作为探测晶体,其尺寸仅为1 cm<sup>2</sup>左右,要生长大面积的探测晶体价格昂贵且容易损坏,如何解决这一问题还需要进一步思考;还有,目前太赫兹脉冲焦平面成像系统所使用的光源多为飞秒激光放大器,同时太赫兹脉冲焦平面成像系统本身光路也比较复杂,这些因素将这种成像技术限制于只能在实验室使用,仅可以为基础研究提供测试平台,很难直接在工业生产中得到应用。是否可以将光源替换为飞秒激光振荡器,同时简化成像系统的光路和缩小成像系统的体积,是这种成像技术未来发展所要面对的难题。

## 5 太赫兹连续波焦平面成像

实际上,除了以太赫兹脉冲作为光源所进行的焦平面成像,还存在着以太赫兹连续波作为光源的焦平面成像系统。这类成像系统与传统的光学成像系统十分类似,通常将太赫兹光束进行扩束并照射样品,利用聚乙烯或高阻硅透镜将样品的太赫兹图像投影到太赫兹CCD摄像头上,实现焦平面成像。可见,太赫兹连续波焦平面成像的出现很大程度上依赖于强太赫兹辐射源和太赫兹阵列探测器的发展。这类系统的优点在于光学系统小巧便于集成,成像速度也很快,有利于工业应用。然而,这类系统也存在着一些缺陷,例如由于所用高功率太赫兹源多为单频辐射源,因此此类成像没有光谱信息;同时此类成像一般属于非相干成像,只能记录物体太赫兹图像强度信息,若要获取物体相位信息,仍需要通过干涉记录数字再现方式进行相位提取。目前,随着太赫兹辐射源、探测器和功能器件的发展,太赫兹连续波焦平面成像技术也趋于成熟。2008年,美国加利福尼亚海军研究院的Behnken等<sup>[56]</sup>利用2.8 THz的量子级联激光器和160像素×120像素的微型热辐射测量阵列摄像头对隐蔽在纸袋中的小刀进行了检测。2012年,德国法兰克福大学Boppel等<sup>[57]</sup>利用590 GHz射频源和100像素×100像素的天线耦合场效应管阵列探测器实现了对金属分辨率板和硬币的太赫兹成像。在国内,也有很多单位致力于太赫兹连续波焦平面成像的研究。例如,哈尔滨工业大学Li等人和北京工业大学的Wang等人分别发展了太赫兹连续波共轴数字全息技术<sup>[58-59]</sup>和层析成像技术<sup>[60]</sup>,对于太赫兹连续波焦平面成像的性能提升起到了巨大的推动作用。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所的Qin等<sup>[61]</sup>利用基于AlGaIn/GaN场效应管设计了太赫兹阵列探测器,实现了对900

GHz 和 340 GHz 太赫兹光斑的成像, 成像帧频达到了 30 Hz, 这对于我国发展太赫兹阵列探测器是一个很大的突破。虽然这种成像技术的应用开发还处于起步阶段, 但是由于此成像技术具有较明显的测量优势, 相信在不久的将来会展现不小的应用潜力。

## 6 结 论

本文针对太赫兹脉冲焦平面成像的诞生、发展和应用, 综述了本科研团队和国际相关课题组的部分工作。为了提高太赫兹成像的测量效率、稳定性与采样率, 人们提出了太赫兹脉冲焦平面成像技术, 实现了面阵太赫兹快速成像。在这项技术的发展过程中, 人们相继通过引入超薄探测晶体、准近场探测、动态相减方法、差分电光探测等手段改进成像系统的空间分辨率与系统信噪比, 以及通过改变探测光的偏振态和更换不同晶向的探测晶体, 让成像系统可以对不同太赫兹偏振分量进行响应, 使得此成像技术几乎可以对太赫兹光场的全部信息进行准确测定。同时, 人们不断开发这项技术的应用领域, 使得太赫兹脉冲焦平面成像作为表征平台已经在光谱识别检测、太赫兹超表面器件功能验证、太赫兹特殊光束矢量测量、太赫兹表面波传输过程表征等诸多领域得到了很好的应用。虽然太赫兹脉冲焦平面成像还存在一些问题有待解决, 但是相信由于这种技术难以比拟的独特优势, 势必成为众多太赫兹技术中的重点发展方向之一, 在工业生产和科学研究中展现重要作用。

## 参 考 文 献

- [1] Liu H B, Chen Y Q, Bastiaans G J, et al. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(1): 415–423.
- [2] Hui X N, Zheng S L, Chen Y L, et al. Multiplexed millimeter wave communication with dual Orbital Angular Momentum (OAM) mode antennas[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 10148.
- [3] Ji Y B, Park C H, Kim H, et al. Feasibility of terahertz reflectometry for discrimination of human early gastric cancers[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, **6**(4): 1398–1406.
- [4] Ye H, Xi M R, Cao H Y, et al. Applications of terahertz technology in medical science and research progress[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(5): 170528.  
叶麾, 郝明蓉, 曹寒雨, 等. 太赫兹技术在医学科学中的应用及研究进展[J]. *光电工程*, 2018, **45**(5): 170528.
- [5] Zhong H, Xu J Z, Xie X, et al. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(2): 203–208.
- [6] Hebling J, Hoffmann M C, Hwang H Y, et al. Observation of nonequilibrium carrier distribution in Ge, Si, and GaAs by terahertz pump-terahertz probe measurements[J]. *Physical Review B*, 2010, **81**(3): 035201.
- [7] Planken P C M, Bakker H J. Towards time-resolved THz imaging[J]. *Applied physics A*, 2004, **78**(4): 465–469.
- [8] Mittleman D M, Hunsche S, Boivin L, et al. T-ray tomography[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(12): 904–906.
- [9] Ferguson B, Wang S H, Gray D, et al. T-ray computed tomography[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(15): 1312–1314.
- [10] Cocker T L, Jelic V, Gupta M, et al. An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(8): 620–625.
- [11] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 121105.
- [12] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(16): 1716–1718.
- [13] 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.
- [14] Wang X K. Studies and improvement of key techniques in THz real-time imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 48–50.  
王新柯. 太赫兹实时成像中关键技术的研究与改进[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 48–50.
- [15] 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.
- [16] Yasui T, Sawanaka K I, Ihara A, et al. Real-time terahertz color scanner for moving objects[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2): 1208–1221.
- [17] Wang X K, Cui Y, Hu D, et al. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(24): 4683–4687.
- [18] 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.
- [19] Wang X K, Cui Y, Sun W F, et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, **27**(11): 2387–2393.
- [20] Zhang R X, Cui Y, Sun W F, et al. Polarization information for terahertz imaging[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(34): 6422–6427.
- [21] Blanchard F, Doi A, Tanaka T, et al. Real-time terahertz near-field microscope[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 8277–8284.
- [22] 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.
- [23] He J W, Wang X K, Hu D, et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 20230–20239.
- [24] Zhong H, Redo-Sanchez A, Zhang X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9130–9141.
- [25] Schirmer M, Fujio M, Minami M, et al. Biomedical applications of a real-time terahertz color scanner[J]. *Biomedical Optics Express*, 2010, **1**(2): 354–366.
- [26] Usami M, Yamashita M, Fukushima K, et al. Terahertz wide-band spectroscopic imaging based on two-dimensional electro-optic sampling technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(14): 141109.
- [27] Wu Q, Werley C A, Lin K H, et al. Quantitative phase contrast imaging of THz electric fields in a dielectric waveguide[J].

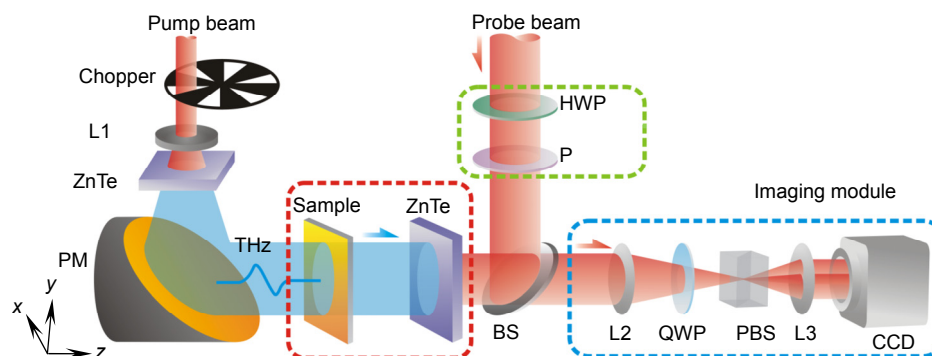
- Optics Express*, 2009, **17**(11): 9219–9225.
- [28] Yu N F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333–337.
- [29] Hu D, Wang X K, Feng S F, *et al.* Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, **1**(2): 186–191.
- [30] Wang S, Wang X K, Kan Q, *et al.* Spin-selected focusing and imaging based on metasurface lens[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(20): 26434–26441.
- [31] He J W, Wang S, Xie Z W, *et al.* Abruptly autofocusing terahertz waves with meta-hologram[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(12): 2787–2790.
- [32] Wang B, Quan B G, He J W, *et al.* Wavelength de-multiplexing metasurface hologram[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 35657.
- [33] Ge S J, Chen P, Shen Z X, *et al.* Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(11): 12349–12356.
- [34] Jia M, Wang Z, Li H T, *et al.* Efficient manipulations of circularly polarized terahertz waves with transmissive metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**: 16.
- [35] Khonina S N, Kazanskiy N L, Volotovskiy S G. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, **58**(9): 748–760.
- [36] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499–1501.
- [37] Arlt J, Padgett M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(4): 191–193.
- [38] Wang X K, Shi J, Sun W F, *et al.* Longitudinal field characterization of converging terahertz vortices with linear and circular polarizations[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(7): 7178–7190.
- [39] Wu Z, Wang X K, Sun W F, *et al.* Vector characterization of zero-order terahertz Bessel beams with linear and circular polarizations[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 13929.
- [40] Martelli P, Tacca M, Gatto A, *et al.* Gouy phase shift in nondiffracting Bessel beams[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(7): 7108–7120.
- [41] Li H T, Wang X K, Wang S, *et al.* Vector measurement and performance tuning of a terahertz bottle beam[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 13177.
- [42] Bitman A, Moshe I, Zalevsky Z, *et al.* Improving depth-of field in broadband THz beams using nondiffractive Bessel beams[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(19): 4164–4166.
- [43] Nanni E A, Huang W R, Hong K H, *et al.* Terahertz-driven linear electron acceleration[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 8486.
- [44] Maier S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*[M]. New York: Springer, 2007: 21–37.
- [45] Zhu W Q, Nahata A. Electric field vector characterization of terahertz surface plasmons[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(9): 5616–5624.
- [46] Adam A J L, Brok J M, Seo M A, *et al.* Advanced terahertz electric near-field measurements at sub-wavelength diameter metallic apertures[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7407–7417.
- [47] Wang X K, Wang S, Sun W F, *et al.* Visualization of terahertz surface waves propagation on metal foils[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 18768.
- [48] Li H T, Wang X K, Wang S, *et al.* Realization and characterization of terahertz surface plasmon light capsules[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(9): 091110.
- [49] Yasuda T, Kawada Y, Toyoda H, *et al.* Terahertz movies of internal transmission images[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(23): 15583–15588.
- [50] Zhang L L, Karpowicz N, Zhang C L, *et al.* Real-time nondestructive imaging with THz waves[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(6): 1473–1475.
- [51] Abraham E, Cahyadi H, Brossard M, *et al.* Development of a wavefront sensor for terahertz pulses[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(5): 5203–5211.
- [52] Wang X K, Xiong W, Sun W F, *et al.* Coaxial waveguide mode reconstruction and analysis with THz digital holography[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(7): 7706–7715.
- [53] Wang X K, Sun W F, Cui Y, *et al.* Complete presentation of the Gouy phase shift with the THz digital holography[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(2): 2337–2346.
- [54] Ushakov A, Chizhov P, Bukin V, *et al.* Broadband in-line terahertz 2D imaging: comparative study with time-of-flight, cross-correlation, and Fourier transform data processing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, **35**(5): 1159–1164.
- [55] Siddique M, Zhang W, Li Z, *et al.* Theoretical design of terahertz-wave parametric oscillator using LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(3): 114–118.  
西迪科, 张维, 李卓, 等. 用参量法通过 LiNbO<sub>3</sub> 晶体产生太赫兹的理论设计[J]. *光电工程*, 2006, **33**(3): 114–118.
- [56] Behnken B N, Karunasiri G, Chamberlin D R, *et al.* Real-time imaging using a 2.8 THz quantum cascade laser and uncooled infrared microbolometer camera[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(5): 440–442.
- [57] Boppel S, Lisauskas A, Max A, *et al.* CMOS detector arrays in a virtual 10-kilopixel camera for coherent terahertz real-time imaging[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(4): 536–538.
- [58] Xue K, Li Q, Li Y D, *et al.* Continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3228–3230.
- [59] Rong L, Lатычевская Т, Wang D Y, *et al.* Terahertz in-line digital holography of dragonfly hindwing: amplitude and phase reconstruction at enhanced resolution by extrapolation[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(14): 17236–17245.
- [60] Li B, Wang D Y, Zhou X, *et al.* A continuous-wave terahertz 3-D computed tomography using a pyroelectric array detector[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, **15**(1): 21–25.  
李斌, 王大勇, 周逊, 等. 基于面阵式探测器连续太赫兹波三维层析成像[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, **15**(1): 21–25.
- [61] Luo M C, Sun J D, Zhang Z P, *et al.* Terahertz focal plane imaging array sensor based on AlGaIn/GaN field effect transistors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(3): 0320001.  
罗木昌, 孙建东, 张志鹏, 等. 基于 AlGaIn/GaN 场效应晶体管的太赫兹焦平面成像传感器[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(3): 0320001.



# Advancement and application of terahertz pulsed focal-plane imaging technique

Wang Xinke, Zhang Yan\*

Beijing Key Lab for Metamaterials and Devices; Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China



Terahertz pulsed focal-plane imaging system

**Overview:** As a class of novel far-infrared testing technology, terahertz (THz) imaging has been rapidly developed for recent decades due to characteristics of the THz radiation, such as low photon energy, broad bandwidth, and high transmission to non-polar materials. Notably, the THz pulsed focal-plane imaging technique has become an important composition in all kinds of THz imaging methods because of its obvious measurement advantages. When the THz pulsed focal-plane imaging is employed, two-dimensional THz information of a substance can be accurately acquired in a single measurement and the raster scan process in traditional THz imaging is effectively avoided, which leads to the reduction of the experimental time as well as the enhancements of the measurement stability and sampling ratio. In this review, the technique innovations and application explorations of THz pulsed focal-plane imaging are introduced. This THz imaging technique was firstly proposed in 1996 and various means have been applied to improve its performance. With the development of the imaging technique, the super-thin sensor crystal and the quasi-near-field detection are introduced to improve the imaging spatial resolution; the dynamics subtraction and the balanced electro-optic detection are applied to enhance the signal-to-noise ratio of the imaging system. In addition, this imaging system can individually measure different THz polarization components ( $E_x$ ,  $E_y$ , and  $E_z$ ) by varying the polarization of the probe beam and using the sensor crystals with different crystalline orientations. Currently, it can be said that almost all of THz wave-front information can be obtained by using this imaging technique. With the maturation of the imaging technique, it has been applied into various industrial and fundamental research fields. Utilizing the spectroscopic measurement ability of the imaging system, identification of different chemical and biological samples can be achieved. Utilizing the vectorial measurement ability of the imaging system, the function of THz meta-surface devices, characterizations of THz special beams, and observations of THz surface electromagnetic waves have been demonstrated. Besides, this imaging technique has been also applied to measure transmission modes of THz waveguides, inspections to concealed objects, and so on. Of course, there is still much room for the future improvement of this imaging technique, such as the further enhancement of the signal-to-noise ratio, the enlargement of the imaging region, and the simplification of the optical configuration. Nevertheless, it can be expected that the imaging technique will show its tremendous application potentials in the future.

**Citation:** Wang X K, Zhang Y. Advancement and application of terahertz pulsed focal-plane imaging technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190413

Supported by National Natural Science Foundation of China (11474206, 11404224, 11774243, 11774246)

\* E-mail: yzhang@mail.cnu.edu.cn