

文章编号: 2095-4980(2021)05-0778-06

太赫兹二维成像技术研究进展

梁 践^{1,2,3}, 周 欢^{2,3}, 彭晓昱^{*1,2,3}

(1.重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065; 2.中国科学院 重庆绿色智能技术研究院太赫兹技术研究中心, 重庆 400714;
3.中国科学院大学 重庆学院机器人与智能制造学院, 重庆 400714)

摘 要: 太赫兹成像技术在人体安检、无损探伤、质量监控、生物医学、半导体特性表征等许多领域展现出广泛的应用前景。本文综述了各类太赫兹二维成像技术, 包括太赫兹扫描成像、太赫兹单像素成像、电光调制太赫兹成像、太赫兹相机直接成像等技术, 综述各类成像技术的研究背景, 分析了具体的成像方法和成像结果, 总结了不同太赫兹成像技术的优缺点并对今后太赫兹成像技术的发展趋势做出展望。

关键词: 太赫兹波; 太赫兹扫描成像; 太赫兹单像素成像; 电光调制太赫兹成像; 太赫兹相机
中图分类号: O433; TN29 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2021131

Research progress of two-dimensional terahertz imaging technology

LIANG Jian^{1,2,3}, ZHOU Huan^{2,3}, PENG Xiaoyu^{*1,2,3}

(1.School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China; 2.Terahertz Technology Research Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3.College of Robotics and Intelligent Manufacturing, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: Terahertz (THz) imaging has shown wide application prospects in many fields such as human body security inspection, non-destructive inspection, quality monitoring, biomedicine, and semiconductor characterization. In this article, various two-dimensional THz imaging techniques are reviewed, including scanning imaging, single-pixel imaging, electro-optic modulation imaging, direct imaging with THz camera, and so on. The research backgrounds of various imaging technologies are summarized, the specific imaging methods and imaging results are analyzed. The advantages and disadvantages of different terahertz imaging technologies are concluded, and the future development trends of terahertz imaging technologies are forecasted.

Keywords: THz wave; THz scanning imaging; single-pixel THz imaging; THz electro-optic modulation imaging; THz camera

太赫兹波(Terahertz, THz)是指频率在 0.1~10 THz, 波长在 3~30 μm , 介于微波与红外波之间的电磁波。太赫兹波不能透过金属, 但对许多非金属、电介质材料和非极性物质(比如陶瓷、织物、纸张等)具有较强的透过性; 太赫兹辐射的光子能量较低, 没有类似 X 射线对生物组织的电离损伤作用, 能避免生物体在检查时遭受辐射损伤。因此太赫兹波非常适合在人体安检领域用于对隐蔽的危险物品进行检测。此外, 太赫兹辐射波长比微波短, 因而相比于微波成像, 太赫兹成像具有更高的空间分辨力。太赫兹成像技术种类繁多, 大致可分为两大类, 即扫描式和非扫描式成像技术。考虑到篇幅有限, 本文仅讨论基于光子学太赫兹辐射源的二维太赫兹成像技术。受太赫兹辐射源强度和探测器灵敏度限制, 太赫兹成像系统大多采用扫描技术。最早的太赫兹成像系统中采用逐点扫描技术来获得二维太赫兹图像, 成像过程过于漫长。为提高成像速度, 线扫描、块扫描(或面扫描)以及单像素成像等加快采样速度的方案相继被提出。上述远场太赫兹成像的空间分辨力较低, 人们发展了太赫兹近场扫描成像技术来提高成像分辨力至微米甚至纳米量级。为了实现实时太赫兹成像, 人们提出了非扫描式的光学成像技术, 如利用太赫兹波束在电光晶体中对探测光束的调制作用并使用普通光学电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-06-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0701000); 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金资助项目(U2030119)

*通信作者: 彭晓昱 email:xypeng@cigit.ac.cn

相机记录的太赫兹成像技术，另外一条途径是设计较高灵敏度的二维太赫兹微探测器阵列(太赫兹相机)直接成像。

1 太赫兹扫描成像技术

1.1 太赫兹逐点扫描成像技术

最简单的二维太赫兹逐点扫描成像技术采用连续波(即单频)太赫兹辐射源，通过 x 和 y 二维扫描，透过被测物体后由后面的探测器接受并逐点记录太赫兹波束的强度信息，根据这些不同点 (x,y) 对应的太赫兹强度信息即可重构被测物体的太赫兹图像。这种方法虽然简单，但却不能获得每个点的光谱信息，因而不能用来实现多层扫描的飞行时间成像。另一种逐点扫描方法是在基于宽带太赫兹辐射源的太赫兹时域光谱系统中，将被测样品置于 xy 二维精密电动平移台上。对于被测物体的每一个位置 (x,y) 测量时域光谱信号，提取每个位置对应的某个频率 f 的太赫兹频谱强度数据 $I(x,y)$ 即可重构太赫兹图像。提取不同频率的太赫兹频谱强度数据结合相应的扫描精确度即可获得不同分辨力的太赫兹图像。

图 1(a)为美国贝尔实验室的太赫兹时域光谱逐点扫描成像系统，HU 等^[1]使用该系统在 1995 年获得了新鲜状态下树叶和脱水 48 h 后树叶的太赫兹图像，见图 1(b)。如果采用反射模式，这种技术还可用于飞行时间成像。这种成像技术缺点是需要逐点扫描并测量每个点的时域光谱，非常耗时。

1.2 太赫兹线扫描成像技术

鉴于太赫兹逐点扫描成像过于耗时，2008 年日本大阪大学的 YASUI T^[2]研究团队对上述技术进行了改进，提出了太赫兹脉冲焦线扫描成像方案。其光路原理见图 2^[2](a)，太赫兹波束通过柱透镜(CL1)汇聚成一条焦线照射在样品上，太赫兹焦线在通过样品后又经过一个球透镜(L2)和另一个柱透镜(CL2)变为平行光。探测光先经过扩束，并且和太赫兹光束形成非共线重合，不同重合区域对应着不同的时间延迟。在重合的区域中，探测光和探测晶体保持相对垂直，由探测晶体对太赫兹信号进行光电采样。最后，直接从互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机获取的图像中提取出太赫兹信号，减少实验损耗的时间。YASUI T 研究团队通过此

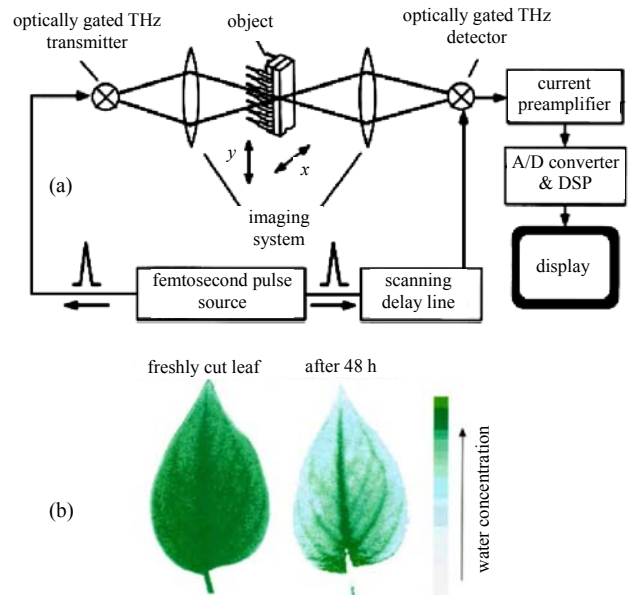


Fig.1 (a) Terahertz point-by-point scanning imaging optical path principle; (b) Terahertz intensity image of leaves obtained by terahertz point-by-point scanning imaging

图 1 (a) 太赫兹逐点扫描成像光路原理; (b) 由太赫兹逐点扫描成像获得的树叶太赫兹强度图像

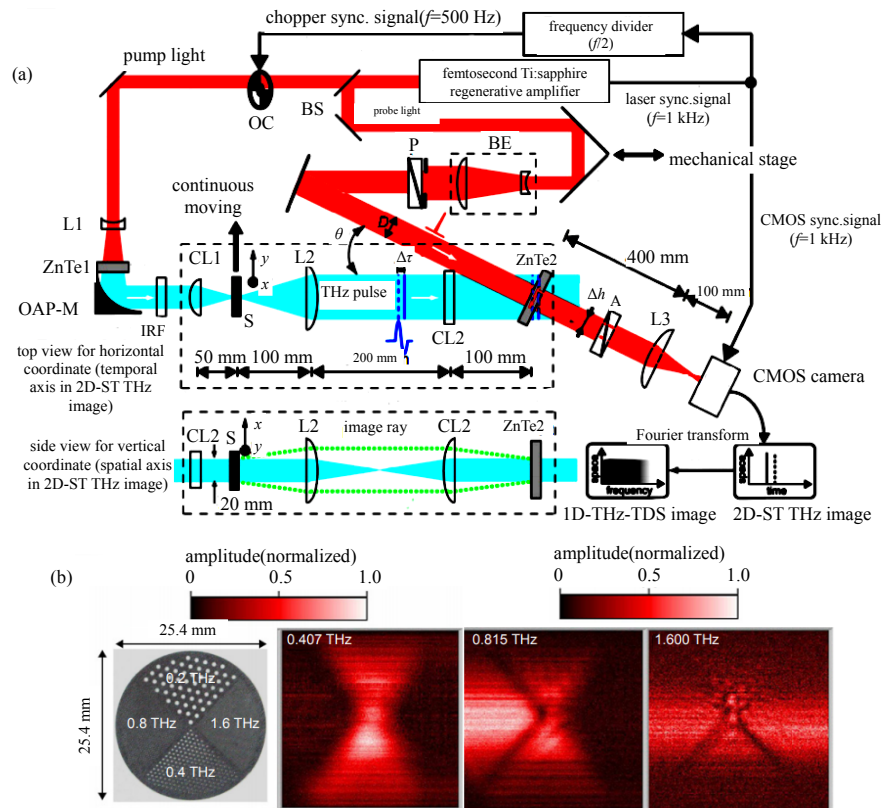


Fig.2 (a) Principle of terahertz pulse focal line imaging optical path; (b) Metal hole array samples and terahertz images of samples

图 2 (a) 太赫兹脉冲焦线成像光路原理; (b) 金属孔阵列样品和样品的太赫兹图像

最后，直接从互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机获取的图像中提取出太赫兹信号，减少实验损耗的时间。YASUI T 研究团队通过此

系统对一个金属孔阵列样品进行成像, 样品分为 4 个区域, 并且每个区域的孔阵列尺寸是不同的, 移动速度为 1 mm/s 的样品横向通过太赫兹焦线, 图 2(b) 分别是在波段为 0.407 THz, 0.815 THz, 1.600 THz 下的样品太赫兹图像。通过图像可以看出, 成像分辨率随着频率的增大而升高。此外, 由于使用 CMOS 相机采集太赫兹图像, 无法做到锁相滤波以至于太赫兹信号信噪比较低。

1.3 太赫兹面扫描成像技术

如果太赫兹波束具有足够的强度, 还可以进一步采用面扫描方式提高成像速度。以被动式太赫兹面扫描成像技术为例, 该技术采用具有幅宽大、稳定性好等特点的 45° 镜, 在详细分析 45° 镜扫描成像的工作原理和扫描方式后, 提出绕 Z 轴摆动实现水平扫描, 绕 Y 轴摆动实现垂直步进的扫描方案, 最终实现在大视场情况下太赫兹二维面扫描图像, 见图 3^[3]。图 3(a) 以单位矢量 N 表示镜面法线矢量, A 和 A' 分别表示入射光线与反射光线, 可以得出相互之间的矢量关系^[4-5]。接着建立图 3(b) 的 XYZ 坐标系, 扫描镜为椭圆平面反射镜, 长轴在 XOY 平面内, 短轴与 Z 轴重合, 镜面法线 N 与 X 轴的夹角为 135° 。 45° 旋转扫描镜通过绕 Z 轴来回摆动实现水平方向扫描, 绕 Y 轴来回摆动实现垂直方向步进, 从而达到对扫描视场的覆盖。根据光路可逆原理, 定义沿后光路光轴方向的光线为入射光线, A 为沿后光路光轴方向的单位矢量, A' 是 A 经过面镜的像矢量, 扫描系统示意图以及成像结果见图 4^[3]。从图 4 可见扫描成像不存在明显畸变, 但分辨率仍需进一步提高。

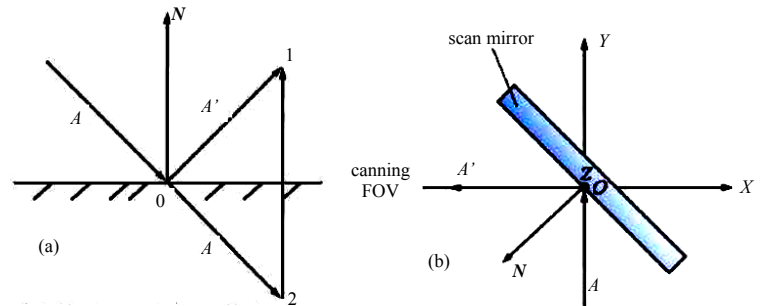


Fig.3 (a) Mirror reflection vector; (b) 45° mirror scanning principle diagram
图 3 (a) 镜面反射矢量图; (b) 45° 镜面扫描原理图

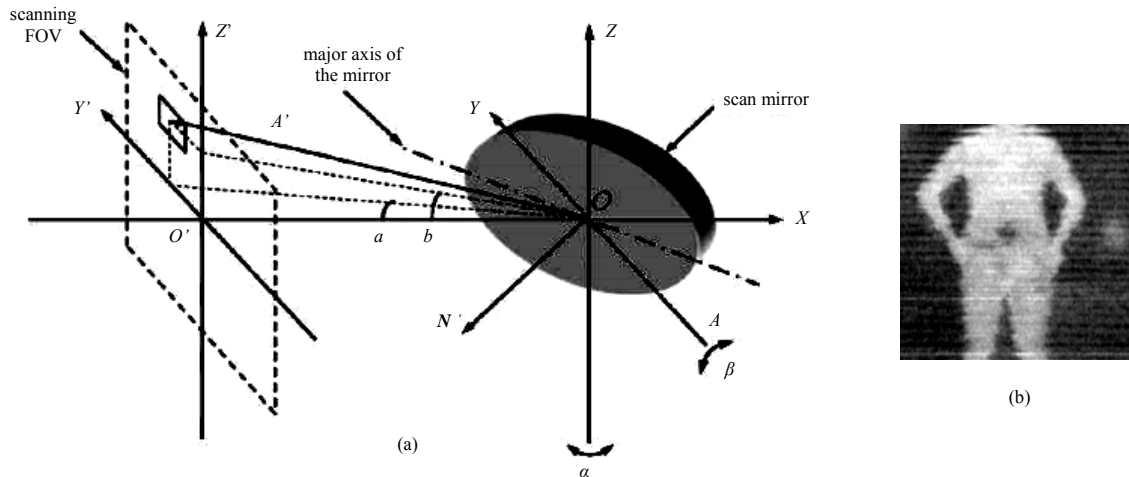


Fig.4 (a) Sketch map of scanning FOV; (b) Terahertz surface scan imaging
图 4 (a) 扫描视场示意图; (b) 太赫兹面扫描成像图

自 1995 年贝尔实验室开发出首套基于时域光谱的太赫兹透射扫描成像装置并进行首次太赫兹成像之后, 经历点扫描、线扫描、面扫描太赫兹成像技术的发展阶段, 能够实现对物品含水量、违禁刀具、电路亚波长损伤、半导体以及生物组织等样品的太赫兹图像探测。

1.4 太赫兹单像素成像技术

在太赫兹扫描成像系统中, 由于使用机械扫描进行逐像素采集, 限制了获取完整图像的速度, 导致成像过程十分耗时。为此, 有研究团队借鉴光学波段的单像素成像技术和压缩感知技术, 减少采样次数, 加快了成像速度。单像素成像仅需一个单点探测器即可实现目标物体的空间信息获取从而重建物体图像, 有望为太赫兹成像提供兼顾成本和效率的解决方案。

考虑到在空间傅里叶域的图像压缩比很高, 在空间傅里叶域采样信号, 有望在低采样率下重建出高质量的图像。据此, 中国科学院深圳先进技术研究院光电中心团队^[6]提出并实现了基于空间傅里叶谱的新型太赫兹单像素成像技术。该技术中使用空间光调制器(Digital Micromirror Device, DMD)产生正弦条纹对入射到硅基石墨烯上

的太赫兹光束进行调制，太赫兹单像素探测器获取物体二维图像的空间傅里叶谱，最后通过逆傅里叶变换重构出成像目标的二维图像。实验装置原理与结果如图 5^[6]所示。整个太赫兹傅里叶单像素成像系统基于典型的光导天线的扫描式太赫兹时域光谱系统。在连续波(Continuous Wave, CW)激光照射下，高阻硅(Graphene On a high-resistance Silicon, GOS)衬底上的单层石墨烯可作为太赫兹调制器工作，见图 5(a)。图 5(b)~(c)显示了太赫兹脉冲及其频谱。太赫兹脉冲的中心频率约为 0.22 THz，对应的中心波长为 1.363 mm。直径为 3.82 mm 的太赫兹光束被传送到 GOS 衬底上。被测目标物是在基底另一侧通过光刻和热蒸发制备一层 100 nm 厚的三臂侧车轮图案的金薄膜，具体成像结果见图 6^[6]。实验结果表明，该技术能够极大地降低测量次数，在保证成像质量的前提下提高成像效率，仅需图像像素数 11.8% 的测量次数就能成功重构出清晰的太赫兹图像，而且实现光致太赫兹调制使用的是普通的半导体激光器，降低系统成本。

虽然太赫兹单像素成像技术有望极大地提高成像速度，但成像效率还有待进一步提高。

1.5 太赫兹近场成像技术

太赫兹远场扫描成像的分辨力主要取决于系统的太赫兹焦斑直径(即太赫兹波的波长)以及扫描步长，为了突破与波长相关的光学衍射极限，获得亚毫米级乃至纳米级空间分辨力的精细图像，科研人员提出了太赫兹近场成像技术，可实现样品表面的无损扫描超分辨太赫兹成像^[7]。太赫兹近场成像技术主要有两种：一是基于孔径的太赫兹近场成像；二是基于尖端散射的太赫兹近场成像。

孔径型太赫兹近场成像技术的关键器件是亚波长孔径，根据孔径位置的不同分为近场孔径照明模式和近场孔径收集模式两种。近场孔径照明模式是将样品放置于亚波长孔径的近场中，太赫兹波受孔径限制后对被测物体进行近场照射。与近场孔径照明不同，近场孔径收集模式中，将探测器集成到亚波长孔径的近场区域，或者远场探测经近场微孔转化后收集太赫兹波。

基于尖端散射的太赫兹近场成像技术中，太赫兹波聚焦在亚波长金属尖端上，该尖端像孔径一样能够在极小的区域内形成很强的太赫兹局域场。尖端在接近物体时，能够将近场中和样品相互作用的隐失波耦合转化成传播波后散射在远场中。当飞秒激光泵浦半导体材料时将产生电偶极矩，电偶极矩与尖端耦合之后会调制其正下方的局域电场，由于受到调制的影响，半导体表面会产生背景噪声，锁相检测是滤除背景噪声的有效方法之一，所以远场探测器在通常情况下要求尖端以固有频率进行机械调制并使用锁相放大器进行太赫兹检测^[8-10]。图 7^[11]给出太赫兹散射型扫描近场光学显微镜用于单个蛋白质的近场纳米太赫兹成像图。

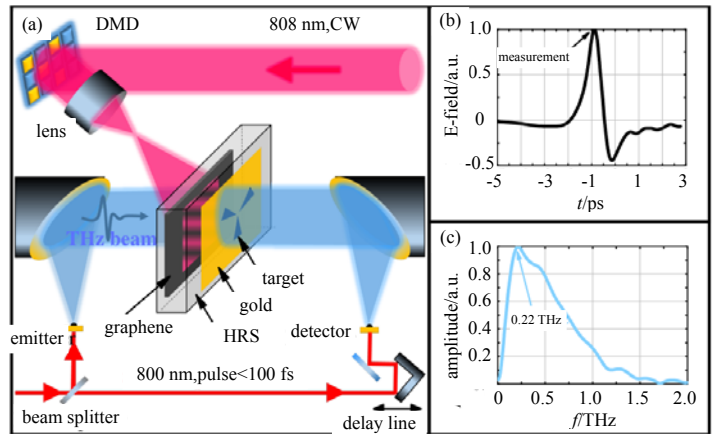


Fig.5 (a) Schematic diagram of terahertz Fourier single-pixel imaging system; (b) Electric field; (c) Normalized Fourier transform of the generated terahertz radiation

图 5 (a) 太赫兹傅里叶单像素成像系统原理图; (b) 太赫兹电场信号; (c) 太赫兹辐射的归一化傅里叶变换频谱

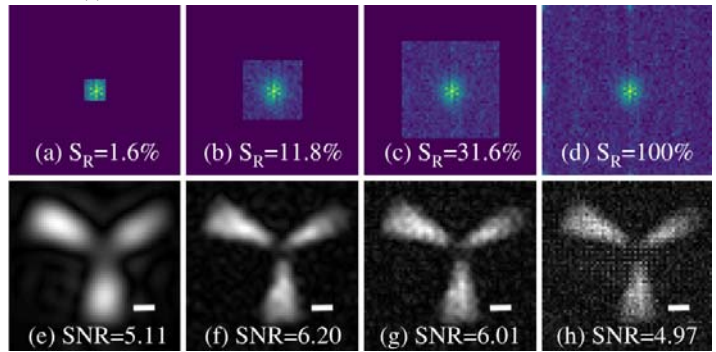


Fig.6 (a)~(d) Truncated spatial Fourier spectrum of different sampling ratios in terahertz FSI experiments; (e)~(h) Corresponding reconstructed images with SNRs labeled

图 6 (a)~(d) 截断太赫兹傅里叶实验中不同采样比的空间傅里叶谱; (e)~(h) 相应的信噪比标记的重构图像

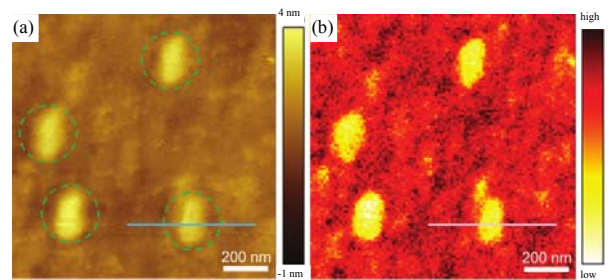


Fig.7 (a) Topographical image of IgG molecules, in which each of the molecules is marked by the dashed circles; (b) Corresponding THz s-SNOM image with 200×200 pixels

图 7 (a) IgG 分子的地形图，其中每个分子都由虚线圆圈标记; (b) 对应于 200×200 像素的 THz s-SNOM 图像

2 二维太赫兹非扫描成像技术

由于传统太赫兹扫描成像技术采用逐点、逐线或逐块记录的方式, 总体说来非常耗时。要提高成像速度, 最好采取光学非扫描的光学成像模式。由透过被测物体或由被测物体反射的太赫兹波通过电光调制的探测光束直接成像到一个二维的可见光相机上, 或者由透过被测物体或由被测物体反射的太赫兹波直接成像到一个二维太赫兹波探测器阵列上直接读出被测物体的太赫兹像。

2.1 电光调制二维太赫兹成像技术

电光调制二维太赫兹成像最早于 1996 年由美国伦斯勒理工大学的张希成^[12]等提出并实现。在 2010 年, 首都师范大学的 Wang、Zhang 等^[13]利用多项技术对电光调制二维太赫兹成像技术做出了改进^[14-15], 改进后的光路原理以及双缝金属模板的成像见图 8。该系统主要针对成像系统的分辨力和信噪比进行改进。通过准近场成像技术, 使探测光束与太赫兹光束进行相对传输, 一起照射在探测晶体上, 晶体的左侧表面反射探测光束, 使之与太赫兹光束共线, 从而利用电光采样技术进行相干探测。由于太赫兹波处于亚毫米波段, 这种测量方法能够获取部分太赫兹光波的近场信息, 这使得系统成像的分辨力大幅度提升。该技术同样存在一些局限: 无法锁相滤波导致单像素太赫兹信号的信噪比较差、成像区域受探测晶体的面积大小限制、系统需要较强的太赫兹波束等等。

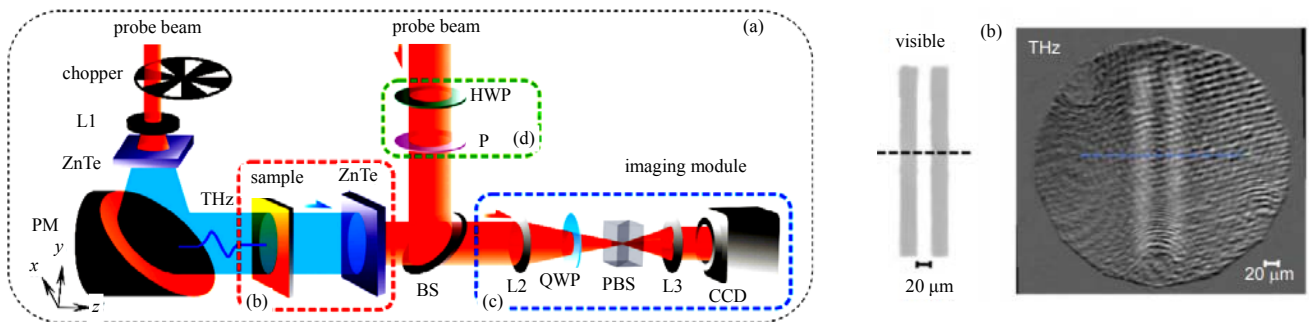


Fig.8 (a) Improved terahertz pulse focal plane imaging; (b) Optical and Terahertz image of double-slit metal template
图 8 (a) 改进后太赫兹脉冲焦平面成像; (b) 双缝金属模板的光学与太赫兹图像

2.2 利用二维太赫兹探测器阵列(太赫兹相机)直接成像

上述电光调制二维太赫兹成像技术需要较强的太赫兹波束才能对探测光进行调制, 而且需要减去没有太赫兹光调制时作为背景的探测光, 严格意义上说还没有真正达到实时成像。为了实现真正的实时成像, 需要发展对太赫兹波束能直接成像的二维探测器阵列和基于这些探测器阵列的太赫兹相机。主要有以下几类二维探测器阵列: 热释电探测器阵列、微测热辐射计阵列、差频探测器阵列、半导体微结构探测器阵列。目前较为常见的商用太赫兹相机主要基于热释电探测器阵列和微测热辐射计阵列。如日本 NEC^[16]公司推出基于微测热辐射计阵列的手持式太赫兹相机 IRV-T0831, 见图 9(a)。该相机像元数为 320×240 , 频率响应范围为 $1 \sim 7$ THz, 能够实现在 $1 \sim 7$ THz 频率内的太赫兹实时成像, 其成像结果见图 9(b)。该图像为多发累积结果, 信噪比较低, 可见该相机的灵敏度仍然有很大的提升空间, 目前已停产。

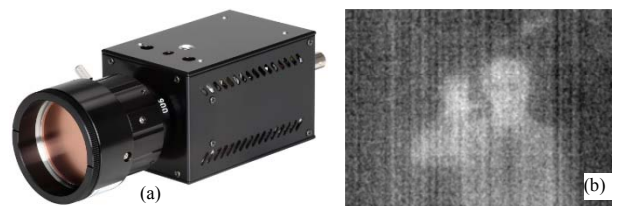


Fig.9 (a) IRV-T0831 Terahertz camera from NEC Japan;
(b) Terahertz image taken at a frame rate of 60 Hz
图 9 (a) 日本 NEC 公司的 IRV-T0831 太赫兹相机;
(b) 以 60 Hz 的帧频拍摄的太赫兹图像

国外在太赫兹相机的研发方面起步较早, 技术较领先, 我国太赫兹相机的发展较晚, 但是国家给予了高度重视。2008 年, 基于铌酸锂材料的 124×124 阵列热释电太赫兹探测器由哈尔滨工业大学和深圳大学联合研制, 搭建的太赫兹成像系统实现了对信封中铅笔字的实时成像^[17]。2015 年, 电子科技大学在 VOx 微测热辐射计的基础上, 在微桥结构的顶层沉积纳米钛金属薄膜作为吸收层, 研发了 320×320 阵列规模的非制冷太赫兹焦平面, 实现了实时连续太赫兹检测, 可以有效地对信封中的回形针开展透射成像实验^[18]。

现有太赫兹相机灵敏度还有待于进一步提高, 此外价格仍然较昂贵, 还需要开展更多的太赫兹波与材料的相互作用研究, 探索新原理和新机制, 发展更低成本的新型高灵敏度太赫兹二维探测器阵列和基于这些探测器阵列的太赫兹相机。

3 总结与展望

本文主要从是否采取扫描式成像方法的角度和应用需求及场景介绍了两类二维太赫兹成像技术,阐明了这些太赫兹成像技术的原理及其优缺点。回顾太赫兹成像技术的发展历程中,从最初的逐点扫描技术开始,为提高成像速度,提出了线扫描成像和面扫描成像,以及以牺牲部分采样数据获取更高成像速度的单像素成像技术;为突破光学衍射极限对成像分辨率的限制,扫描式太赫兹近场成像技术得以发展;为直接获得太赫兹二维成像,提出了电光调制的二维太赫兹成像方案;为真正实现实时成像,还研发了可以直接成像的太赫兹相机。经过二十多年的发展,太赫兹成像技术在不断走向成熟,在许多领域展现出广泛的应用前景。随着越来越多性能更加优异的太赫兹辐射源与探测器的出现,相信在未来太赫兹成像技术将迎来更多突破性的进展。

参考文献:

- [1] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995,20(16):1716-1718.
- [2] YASUI T, SAWANAKA K, IIHARA A, et al. Real-time terahertz color scanner for moving objects[J]. *Optics Express*, 2008,16(2):1208-1221.
- [3] 谢巍,侯丽伟,潘鸣. 被动太赫兹成像二维扫描技术[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014,12(2):176-179. (XIE Wei, HOU Liwei, PAN Ming. 2-D scanning technology in passive terahertz imaging[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014,12(2):176-179.)
- [4] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988. (LIAN Tongshu. Conjugate theory of reflecting prism[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 1988.)
- [5] 刘银年. 45° 镜多元探测器并扫成像特性和扫描轨迹分析[J]. *光学精密工程*, 2002,10(1):110-115. (LIU Yinnian. Analysis of the imaging characteristics and scanning traces of the 45° rotating scanning mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(1):110-115.)
- [6] SHE R, LIU W, LU Y, et al. Fourier single-pixel imaging in the terahertz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,115(2):021101.
- [7] SCHNARS U, FALLDORF C, WATSON J, et al. Digital holography and wavefront sensing[M]. New York:Springer, 2015.
- [8] HUNSCHE S, KOCH M, BRENER L, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998,50(1-6):22-26.
- [9] MITROFANOV O, BRENER I, LUK T S, et al. Photoconductive terahertz near-field detector with a hybrid nanoantenna array cavity[J]. *ACS Photonics*, 2015,2(12):1763-1768.
- [10] KLARSKOV P, KIM H, COLVIN V, et al. Nanoscale laser terahertz emission microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2017,4(11):2676-2680.
- [11] YANG Z, TANG D, HU J, et al. Near-field nanoscopic terahertz imaging of single proteins[J]. *Small*, 2021,17(3):2170008.
- [12] 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.
- [13] 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):24-41. (WANG Xinke, ZHANG Yan. Development and application of terahertz pulse focal plane imaging technology[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2020, 47(5):24-41.)
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] NEC Corporation. High sensitivity real-time uncooled THz imager and transmission THz microscope[ED/OL]. [2012-06]. <http://www.Nec.com>.
- [17] 杨珺,阮双琛,张敏,等. 实时连续波太赫兹成像在邮件检测中的应用[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2008(3):261-264. (YANG Jun, RUAN Shuangchen, ZHANG Min, et al. Application of real-time continuous wave terahertz imaging in mail detection[J]. *Journal of Shenzhen University(Science and Technology Edition)*, 2008(3):261-264.)
- [18] GOU Jun, WANG Jun, ZHANG Xing, et al. Detection of terahertz radiation from 2.52 THz CO₂ laser using a 320 × 240 vanadium oxide microbolometer focal plane array[J]. *RSC Advances*, 2015,5(102):84252-84256.

作者简介:

梁 践(1998-),男,南京市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹成像与图像处理.email:3430875228@qq.com.

彭晓昱(1967-),男,江西省赣州市人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为基于飞秒激光泵浦的强场太赫兹辐射源及应用.