

太赫兹时域光谱成像系统的研究进展

李冠良, 袁英豪, 朱亦鸣

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 太赫兹时域光谱成像技术具有穿透性、超快时间分辨能力、指纹光谱特性、安全无辐射电离等显著特点, 在物质成分光谱分析、工业材料无损检测领域具有独特的应用价值, 成为近年来的研究热点。基于此, 从成像体制和成像算法两个方向进行介绍。在成像体制层面, 全面介绍了逐点扫描成像、太赫兹焦平面成像、太赫兹光电导阵列成像等二维的成像方式, 以及突破衍射极限的太赫兹近场成像技术; 在成像算法层面, 介绍了飞行时间成像和断层扫描成像技术等三维成像方式。列举了太赫兹技术在生物医学、无损检测、安防检测等领域的应用。最后总结了当前太赫兹时域光谱技术所面临的问题。

关键词: 太赫兹; 时域光谱; 成像

中图分类号: O 43 文献标志码: A

Research progress of terahertz time-domain spectral imaging system

LI Guanliang, YUAN Yinghao, ZHU Yiming

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Terahertz time-domain spectroscopic imaging technology has significant features such as penetration, ultra-fast time resolution, fingerprint spectral characteristics, and safe non-ionizing radiation, making it uniquely valuable for spectral analysis of material composition and non-destructive testing of industrial materials, and has become a research hotspot in recent years. This paper introduced from two directions of imaging system and imaging algorithm. At the imaging system level, it comprehensively introduced two-dimensional imaging methods such as point-by-point scanning imaging, terahertz focal plane imaging, and terahertz photoconductive array imaging, as well as terahertz near-field imaging technology that broke through the diffraction limit. At the imaging algorithm level, three-dimensional imaging methods such as time-of-flight imaging and tomographic scanning imaging were introduced. Also, the applications of terahertz technology in biomedical, non-destructive testing were listed, security inspection, and other fields. Finally, the challenges faced of current terahertz time-domain spectroscopy technology were summarized.

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(22dz1200302)

第一作者: 李冠良(1996-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 太赫兹扫描成像系统. E-mail: glli532@163.com

通信作者: 袁英豪(1984-), 男, 副研究员. 研究方向: 太赫兹频率梳精密光谱测量技术. E-mail: yinghao.yuan@foxmail.com

Keywords: *terahertz; time-domain spectroscopy; imaging*

太赫兹 (terahertz, THz) 技术作为一种未来大有前途的实用性技术, 汇集多个学科领域, 并被各国视为改变未来的十大技术之一^[1-2]。在 20 世纪 80 年代中期之前, 由于缺乏产生和探测太赫兹波的方法, 对这一频段的电磁波了解不足, 因此又被称为太赫兹空隙。随着研究的深入, 太赫兹波的独特优势逐渐被发现。例如, 在成像方面, 太赫兹波波长比无线电波波长更短, 因此具有更高的分辨率。相比红外光波, 它的散射要小得多, 从而具有更好的重建精度^[3]。

近年来, 随着超快激光技术和太赫兹辐射源的蓬勃发展, 出现了一些产生稳定太赫兹辐射的方法。比如: 光电导法、光整流法等。高效的太赫兹辐射源和高重复频率的飞秒激光器, 产生的高信噪比和宽频谱的太赫兹辐射, 为太赫兹时域光谱成像系统的研究提供了条件。目前为止, 太赫兹时域成像技术已经发展出了多种成像体制。基于太赫兹时域光谱技术, 介绍了包括逐点成像、焦平面成像、太赫兹近场成像等成像体制以及飞行时间成像、太赫兹断层成像等相关算法, 列举了太赫兹技术的应用, 并对该技术面临的主要问题探讨。希望可以为该领域的研究人员提供一些参考。

1 太赫兹时域光谱技术

太赫兹时域光谱技术是一种相干探测技术, 太赫兹脉冲通过样品后, 探测到的太赫兹脉冲信号携带被测样品的振幅信息和相位信息, 通过对时域波形进行傅立叶变换并计算, 可得到样品的吸收系数、折射率、介电常数等信息。

上海理工大学太赫兹实验室设计了一套太赫兹时域光谱 (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 系统^[4], 该系统使用低温生长的砷化镓制成的光电导天线作为太赫兹辐射源。该系统主要性能参数如下: 扫描速度 0.1 s/谱; SNR>90 dB; 分辨率<5 GHz; 频谱谱宽>3 THz; 体积为 40 cm×30 cm×18 cm。内部采用全光线耦合式光路设计、性能稳定可靠。以这套系统为基础搭建出了透射式、反射式、正入射式以及近场式光路结构用于不同用途的光谱检测。该系统已成功应用于危化

气体、陶瓷、药品成分、生物样品、毒品等物质的检测。此外, 还搭建了基于平移台的点扫描成像系统和基于光束转向的扫描成像系统, 用于对太赫兹成像的研究。

2 太赫兹时域光谱成像技术

太赫兹时域光谱技术以其高穿透性、指纹光谱、瞬态性、相干性、低能性等特殊性质, 在安检、生物检测、无损检测等领域具有广泛的应用前景。其独特的优势也应用在了成像领域, 接下来介绍以 THz-TDS 为基础发展起来的太赫兹时域光谱成像技术。

2.1 逐点扫描成像

上世纪 90 年代起, 基于 THz-TDS 搭建的太赫兹时域光谱成像系统对成像的速度不做要求, 主要应用于对太赫兹波物理特性的研究。将产生的太赫兹通过聚焦透镜或离轴抛物面反射镜, 使其汇聚到焦点位置进行测量, 以获取较高的信噪比。在此基础上, 增加平移台或光束转向器件, 使聚焦点相对被测物做二维运动, 这样就实现了逐点扫描成像。

2.1.1 平移台逐点扫描成像

1995 年, Bell 实验室的 Hu 等^[5]首次使用太赫兹时域光谱技术获得了太赫兹成像图。通过逐点扫描的方式对树叶进行成像, 并对每个点的太赫兹信号进行实时采集、处理、分析和显示, 得出了每个像素点的光谱信息。证实了太赫兹时域光谱成像系统具有实际应用的可能。2004 年, Zimdars 等^[6]介绍了一种固定在 x - y 平台上的反射式点扫描结构, 发射器和反射器各有一个准直透镜和一个聚焦透镜。对 250 mm×135 mm 范围成像时间为 15 min, 分辨率为 1 mm, 对成像速度主要限制的原因是光学延迟系统只能以 20 Hz 速率记录波形。2005 年, Zhong 等^[7]设计了一套反射式太赫兹时域光谱系统, 该系统光路图见图 1, 移动整个探测模块使探测点在样品上进行二维扫描, 最终获取整个有缺陷的泡沫材料的太赫兹成像图。通过对比透射式和反射式系统的信号, 可以得出, 透射式系统能否有效检测与样品系数吸收有关。太赫兹波照透过样品会产生损耗, 从而降低

信噪比，能否有效探测到目标信息，受最大动态范围限制。而反射式系统则不依靠完全穿透样品获取信号，它受限于反射信号的振幅和相位精度^[8-10]。

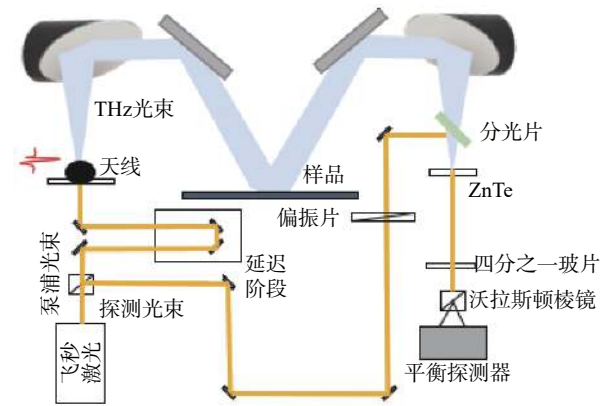


图1 反射式点扫描成像系统^[7]

Fig.1 Reflective spot scan imaging system^[7]

2.1.2 光束转向扫描成像

为了提高单点成像的速度，提出了光束转向方案。光束转向的扫描方式是基于反射式光路发展起来的，泵浦光束通过光束转向系统偏转，经远心透镜照射到目标物上，在转向系统的扫描下，可实现对整个像面的扫描，之后泵浦光再沿原路反射回探测部分，完成对目标的探测。光束转向器件一般有两种：振镜和多边形转镜。这种扫描方式放弃了体积比较庞大的平移台，通过体积更轻便的光束转向器件控制光束的指向，可实现线或面的扫描成像，不需要探测部分移动，也不需要目标物体移动，整个系统体积更小。并且光束通过远心镜头后会聚焦到目标上，保留了聚焦光探测的高信噪比优势。

振镜的偏转会导致从振镜到像面这一段的光程发生变化，从时域波形上会看到波形发生偏移。2011年，Katletz等^[11]研制了一套二维振镜扫描系统，采用二阶多项式拟合的方法，解决了由光程不同产生的波形偏移而引起的像面弯曲问题。每移动到下一个点，延迟线都会根据二阶多项式系数改变，来补偿像面弯曲，可在1~2 min内完成对65 mm×80 mm区域内的胶水粘合塑料板和金属圆成像。2015年，Ok等^[12]分别采用了扫描振镜和多边形转镜的方式对食物进行无损检测成像。同年，Yee等^[13]结合电控光学采样(electronically-controlled optical sampling, ECOPS)方式实现了高速成像，扫描100 mm×100 mm的范围只需40 s。如图2所示，设计了球面和非球面远心 $f-\theta$ 透镜成像对比，得到非球面透镜单向最大光

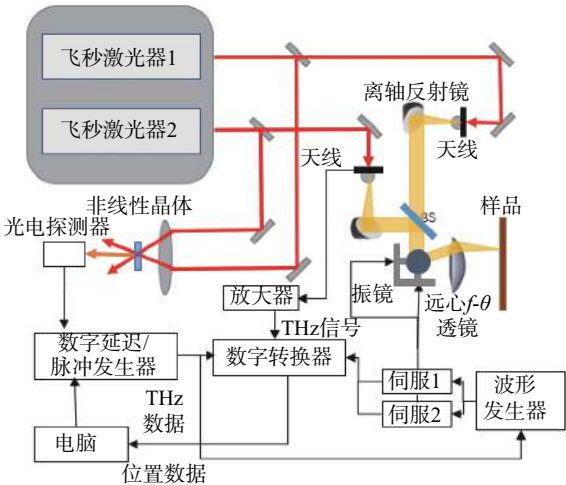


图2 太赫兹波束转向系统^[13]

Fig.2 Terahertz beam steering system^[13]

程偏移为0.42 mm。为了获取横向分辨率，将像面一半遮挡并对沿这方向的数据进行求导，得到的曲线半高宽就是横向分辨率，将频率的权重代入，得到的实际分辨率为5.5 mm。对远心 $f-\theta$ 透镜而言，需要将振镜放置在透镜组前焦距处。然而，由于双振镜系统仅有一面振镜位于 $f-\theta$ 透镜的焦点处，另一面镜子在焦点之外，进行光束转向时，必然会引起像面失真。2020年，Harris等^[14]使用一个单镜双轴振镜放在焦点处，只有一片镜子在远心 $f-\theta$ 透镜的焦点处，避免了由双振镜系统扫描时会发生畸变过大的情况，最终获得了平场焦平面成像，并提出了一种光束转向变换方法，来替代使用非球面透镜来补偿畸变。通过将扫描目标坐标与反射镜偏转角度进行转换，有效避免了图像失真。并采用异步光学采样的方式可实现0.5 s/px的采集速率和0.52 mm的空间分辨率，其中在高频部分的分辨率更高。同年，又研制出谱宽为0.25~1.25 THz的手持式太赫兹时域光谱系统。通过远心光束扫描实现了12 mm×19 mm范围内的扫描成像^[15]。使用点扩散函数(point spread function, PSF)建模和反卷积技术以提高图像的清晰度和对比度，得到了空间分辨率在0.6~0.76 mm之间，促进了太赫兹成像在安检安防中的实际应用。

2.2 面阵成像

尽管光束转向方案比平移台的光栅扫描方案获得了更快速的扫描速率，但依然采用机械式器件进行二维成像，这种单像素成像与实时的太赫兹成像仍有一定差距。为了提高成像速度，科研人员逐渐将微波和红外波段的一些成像方式应用

在太赫兹波段，并提出了一些面阵成像的方式，这里主要对脉冲焦平面成像和光电导天线阵列进行介绍。

2.2.1 脉冲焦平面成像

根据泡克尔斯效应，恒定或交变电场通过电光晶体后会产生双折射效应，且电光晶体折射率的变化与电场的大小成正比。而电荷耦合元件(charge-coupled devices, CCD)可以将二维电场分布转化为二维光强分布，并记录下其光学图像。这种方式成像速度快，仅单次测量就可以获得完整的图像，可实现实时成像，原理上只受 CCD 的检测帧率限制。

1996 年，Wu 等^[16]首次提出了用于实时太赫兹成像系统的脉冲焦平面成像技术。使用 300 μW 的采样光束照射到 6 mm×8 mm 的 ZnTe 晶体上，使用数字 CCD 相机对光束进行检测，得到太赫兹焦点处光斑的半峰全宽为 0.75 mm，如图 3 所示。但其信噪比受 CCD 相机限制，为了提高成像能力，2000 年，Jiang 等^[17]提出了一种类似相敏检测的动态相减技术，通过减小光学背景强度来提高信噪比。实现了成像速度大于 30 帧/s 的实时显示能力。之后，又使用焦距 150 mm 的聚乙烯透镜将光束成像到 40 mm×40 mm×2 mm 的 ZnTe 晶体上，获得了更大的成像范围，最终得到的图像空间分辨率为 2 mm，并对布料遮盖的手枪模型检测识别，获得了清晰的图像^[18]。2019 年，俄罗斯科研人员^[19]在 DSTMS 晶体和 CCD 相机前安装低通滤波器，直接通过 CCD 相机观察到由抛物面反射镜聚焦的光斑，可以观察到 1~3 THz 的太赫兹光波。通过不同焦距的抛物面反射镜对比，发现光斑大小与焦距成线性关系，与脉冲能量呈二次方关系。该方案弥补了 CCD 相机对 1~3 THz 不敏感的缺点，提高了成像系统的实用性能。

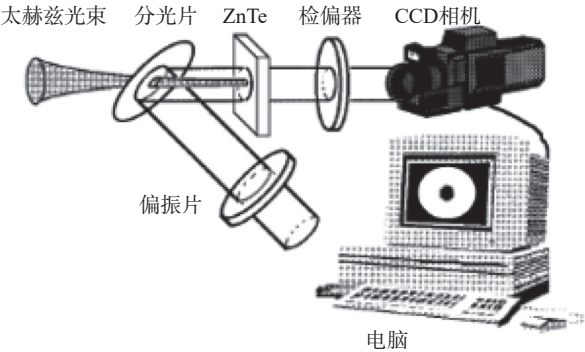


图 3 使用 CCD 对太赫兹光波成像^[16]
Fig.3 Terahertz waves imaging by CCD^[16]

2.2.2 光电导天线阵列

由于 CCD 相机没有使用锁相放大器，其信噪比比光电导天线检测要差。科研人员在单通道光电导天线基础上研究了多通道光电导天线阵列，来实现高信噪比和高速成像。

2008 年，Pradarutti 等^[20]提出了一种微透镜阵列激发的光电导天线阵列，实现了 16 个通道的太赫兹超短脉冲探测。光电导天线与微透镜结合可以使光激发的效率比焦线激发的效率提高一个数量级，这种方法还可以扩展到数百个检测通道。次年，该研究团队^[21]首次提出了 128 个发射和探测通道的太赫兹超短脉冲系统，相邻两探测器之间的间距就是该探测器阵列的分辨率(500 μm)，相比之前探测器在一维上的探测范围有了很大提高。微阵列耦合光电导天线阵列多通道的太赫兹探测方法需要更强和更高效的太赫兹辐射源。2016 年，Yardimci 等^[22]采用等离子体光电导太赫兹发射阵列，经微透镜聚焦到对数螺旋型电极上产生太赫兹，相比之前使用的 H 型电极，在 0.1~2 THz 范围内产生了 1.9 mW 的太赫兹脉冲辐射。2017 年，Alonso-delpino 等^[23]介绍了一种微透镜天线阵列的加工工艺，高度紧凑且成本低，谱宽可达到 1.9 THz，展现了未来微透镜阵列在太赫兹焦平面阵列中的巨大潜力。2014 年，Brahm 等^[24]研制了一种在 1 030 mm 的飞秒激光器激励下工作的一维太赫兹成像系统，探测端为 15 个通道的光电导天线阵列。使用西门子星进行分辨率测试，多通道 TDS 系统的空间分辨率为 1.05 mm，垂直分辨率为 1.13 mm，成像速度相比于单像素的 THz-TDS 系统快了 15 倍。2020 年，Li 等^[25]提出了一种 63 个像素的太赫兹焦平面阵列，该阵列基于等离子体纳米天线阵列实现了 60 dB 的信噪比和 2 THz 的带宽。2021 年，加拿大和俄罗斯的科研人员^[26]采用 LT-GaAs 制作的光电导天线作为发射器和探测器，提出了一种有 8 个通道，64 个像素的可编程计数器阵列 (PCA)，每个通道分别记录 THz 信号产生的光电流，利用空间光调制器 (SLM) 将探测红外波束聚焦到单个或多个光电导天线元件上，可以检测到 1.4 THz 以内的频率，每个天线成单独信道，这些信道可并行查询，大大加快了太赫兹图像采集速度。

2.3 太赫兹三维成像

以上介绍的是 THz 二维平面成像，由于太赫兹对非极性物质有着较强的穿透性，可以通过三

维成像可以得到更多的信息。以下主要介绍太赫兹飞行时间成像和太赫兹断层扫描成像。

2.3.1 太赫兹飞行时间成像

太赫兹飞行时间成像又叫太赫兹脉冲成像, 是基于反射式结构搭建的最早实现太赫兹层析成像的光学系统。太赫兹波照射到物体上反射的回波, 不仅有时间延迟, 还携带着被测材料的相位、振幅、介电常数等信息, 可以计算得出各层之间的菲涅尔系数和时间延迟函数, 从而得出被测物的厚度信息。再通过逐点扫描, 就可以获得完整的三维图像。

1997年, Bell实验室^[27]对一块光盘进行成像, 其中三维深度的所有信息都包含在一个波形中, 通过B扫描获得了层析截面图, 验证了这种方法对材料鉴定的潜力。2005年, Zhong等^[7]搭建了一套反射式太赫兹时域光谱系统, 对绝缘材料分层和空洞两种缺陷进行检测, 该系统对不同结构的缺陷成像分辨率不同。2007年, Yasuda等^[28]提出了一种利用最小二乘法对多元线性回归进行参数估计的方法, 借此来分辨两个时间重叠的THz回波之间的时间延迟。如图4所示, 以铝板为基底, 样本为丙烯酸漆膜, 太赫兹在表面上方的反射光与透过表面二次反射的反射光之间会有 t 的时间延迟, 基于此可以测定膜层的厚度。使用厚漆膜样品确定干漆的群折射率为 $n=1.66$ 。对厚度 d 分别为60, 50, 40, 30, 20, 10 μm 的样品进行测试, 其中厚度为20 μm 以上的样品实现了很好的分辨效果, 测试结果表明该方法的轴向分辨敏感度是傅里叶反卷积法的5倍。2016年, Krimi等^[29]提出了一种自校准模型的回归方程算法, 可以测量多层结构中的单个油漆涂层的厚度。在对电泳层、填充层、金属底漆和透明涂层4层涂料的检测结果中, 可以识别厚度为5 μm 的涂料层。目前, 在提出自校准方法和遗传优化算法的基础上, 已经可以分辨单层4 μm 的厚度识别, 对金属基板、碳纤维增强聚合物和介电基板上的个别涂层测量, 精度可以达到1 μm 。2017年, Dong等^[30]为了对钢板聚合物的腐蚀、分层和气泡进行三维成像, 提出了一种基于自回归谱外推的反卷积法, 对高信噪比处的太赫兹频率分量进行建模, 根据自回归模型对低信噪比区域缺失频率进行外推。结果发现, 太赫兹范围内表征薄层的纵向分辨率得到提高, 得到的三维图像中厚度为50 μm

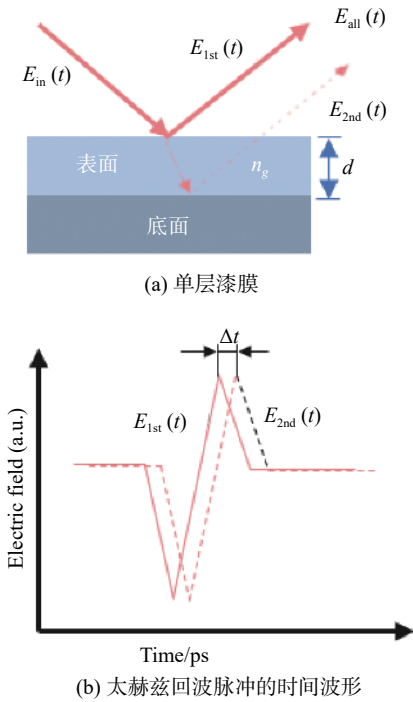


图4 单层漆膜和太赫兹回波脉冲的时间波形^[28]
Fig.4 Single-layer paint film and temporal waveforms of THz echo pulse^[28]

左右的受损薄层可以被很好地区分。

2020年, Zhai等^[31]利用基于改进协方差法 (AR/MCM) 的自回归谱外推方法, 将传递函数的频率成分从高信噪比区域外推到低信噪比区域。由于该方法对噪声的敏感性较高, 需要先对数据进行小波去噪。通过数值模拟和实验验证可以识别出厚度偏差大于10 μm 的样品。

2.3.2 太赫兹断层扫描成像

在三维成像中, 科研人员基于X射线技术发展起一种太赫兹计算机断层扫描 (terahertz computed tomography, THz-CT) 技术, 利用旋转台将被测物体以不同的角度旋转, 每次旋转一定角度后, 将太赫兹波通过被测物体投影到探测器上, 记录下太赫兹波在该角度下的投影图像。多个投影图像可以用来确定被测物体的内部结构。太赫兹波穿透被测物品时, 会被吸收和散射, 物体的结构和材料不同, 被探测到的信号强度也不同, 使用数学算法对获取的数据进行重构和处理, 生成物体的三维图像。

2010年, Abrahame等^[32]提出了一种多峰平均算法, 将由于高斯光束与样品相互作用产生的多峰进行平均, 结合一种反投影算法来降低折射损失的影响。实现该算法的效率主要来自正负峰的

阈值选取。之后,对折射率较低的聚四氟乙烯圆柱和折射率为2.2~2.4(在0.1~1.25 THz之间)的7 mm×9 mm 鸡骨头进行成像,得到圆柱体的截面成像和理论截面相似,由于该算法没有考虑到衍射,导致图像中出现了一些伪影。2013年,Jewariya等^[33]考虑到THz-CT技术的实际应用,采用异步光学采样(ASOPS)技术替代传统的机械延迟装置,以减少扫描时间。使用铌酸锂晶体产生的THz辐射源经过柱面镜压缩的线光源,与传统的点光源THz-CT相比,测量时间大大缩短,可在6 min内完成对胶囊的三维成像。2016年,Perraud等^[34]证实了THz-CT技术可以代替传统的X-ray技术,对增材制造打印出的一些聚合物进行无损检测。对获取的图像采用有序子集凸算法(OSC)进行层析重建,考虑到了THz在样品中传播时的高斯分布,获得了更高质量的图像。为了更加精准地反映图像的三维特征,采用点分割的方法,识别并去除一些背景和噪声,消除了部分伪影的影响。2016年,Tripathi等^[35]提出了一套动态范围大于90 dB的THz-CT系统,发射部分通过种子注入参数,实现频率可调、傅里叶变化极限的高功率THz波,探测部分用光外差实现太赫兹波的超灵敏检测。利用逆拉东变换得到横截面图像,得到的三维图像可分辨出直径为2.74 mm的铅笔芯,且具有较高的对比度。但对塑料薄膜检测时,其图像对比度差,所以THz-CT对软材料的内部缺陷识别效果并不理想。由于太赫兹波在样品中传播时会发生折射效应,因此会对CT扫描的准确性和可靠性产生影响。2022年,Fosodeder等^[36]为了消除这种影响,提出了一种基于多角度数据匹配的折射校正算法,实现了截面的精度优于150 μm。该方法通过对样品的折射率进行估计和校正,消除了样品内部折射效应的影响,通过对扫描结果进行校正,得到了更准确的样品内部结构信息,提高了扫描的准确性和可靠性。

2.4 太赫兹近场成像

之前介绍的成像都是远场成像,根据衍射极限理论,远场太赫兹成像的分辨率限制在几十微米到几百微米,科研人员通过应用近场显微镜的概念,在扫描成像装置的中间焦点处插入一个小直径的聚焦透镜或者将待成像的样品放置在太赫兹发射器(探测器)附近,这种方式探测可以显著提高空间分辨率。近场成像可分为散射成像和亚

波长孔径成像,本节主要讲述亚波长孔径成像,并介绍一种可以商用的光电导微探针近场系统。

1998年,Hunsche等^[37]首次实现了太赫兹波的近场成像。将太赫兹辐射聚焦到小孔径的锥形金属尖端,并在该尖端近场扫描样品,得到了0.6~2.3 THz范围内频域积分的太赫兹信号幅值绘制的灰度图像。其分辨率优于 $\lambda/4$,实现了50 μm的亚波长空间分辨率。之后该实验室发现,由于孔型探针近场成像技术受孔径大小限制,当孔径小于 $\lambda/100$ 时,太赫兹波在小孔上衍射导致THz脉冲波形发生变化,限制了该技术的应用。孔径的大小和波导的长度都会对信号强度造成影响^[38]。2000年,Chen等^[39]使用谱峰为0.9 THz的光束,通过焦距30 cm的透镜聚焦,照射在GaAs晶圆上,通过光门控截断光束得到一个阶跃函数式的太赫兹传输变化,对比度大大提高,获得了亚波长分辨率优于50 μm的太赫兹成像。2001年,Chen等^[40]在砷化镓晶圆上实现了动态孔径的太赫兹近场成像,光束聚焦尺寸可以小到几微米,移动聚焦透镜调节光载流子实现对门控光束尺寸控制,由衍射理论得到,光门控截断光束成像系统检测到的太赫兹信号随光门控光束直径的平方而减小。用等方差法进行近似估计得了 $\lambda/10$ 的亚波长空间分辨率。2012年,Lecaque等^[41]提出了一种扫描激光太赫兹近场成像系统,使用一个二维扫描振镜将1.56 μm的泵浦光照射到光电导天线芯片上,以产生局部太赫兹辐射,经过离轴抛物面反射镜照射到探测器上。探测器探测到的太赫兹光斑与光电导天线局部产生的太赫兹光斑尺寸一致。在中心频率为0.4 THz的频率下,可获得27 μm的空间分辨率。2016年,Liu等^[42]改进波导结构,设计了一种波导长度可以调节的锥形孔径,通过将该结构中心切成两半,实现了波导长度调节,将太赫兹波集中辐射到亚波长大小的区域,该结构可以提高低于介质频率的成像性能。2020年,Wang等^[43]提出了一种圆柱形孔径的新型探针,与空气透镜结合在一起增加了THz波的聚束和透射率。该结构可以消除由于阻抗失配导致的太赫兹波在探针孔径处的大量反射,并在孔径外的近场域中增加了3倍的电场强度。通过实验验证了该探针在0.11 THz时的一维分辨率优于10 μm,相比于原先的探针近场区域的传播距离增加了大约4 μm,放宽了近场测试的距离限制。2022年,该

团队利用该系统实现了对封装铝蚀刻天线阵列的检测，并对柔性金电极阵列成像^[44]。在 0.1 THz 时，表面成像分辨率为 6 μm ，为太赫兹无损检测技术的进一步发展奠定了基础。

对于 THz 近场扫描成像系统，近年来还出现了一种由太赫兹时域光谱技术发展而来的近场光电导微探针 (photoconductive microprobe, PCAM) 技术。不同于散射式扫描近场光学显微镜 (scattering-type scanning near-field optical microscopy, s-SNOM) 系统，PCAM 技术是将探测端的探测光电导天线更换为光电导微探针，通过光激发光束，照射到针尖光开关位置来实现探测，同样实现了突破衍射极限的微米级的分辨率。虽然没有 s-SNOM 的分辨率高，但其光路相比于散射式的近场探测系统更简单、成本更低，可实现商用化。

2019 年，Geng 等^[45] 基于光电导天线微探针的太赫兹近场技术，对 500 $\mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ 的小鼠脑组织切片进行 THz 近场成像，成像像素大小为 20 $\mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ ，结果可以清晰地识别出大脑区域和胼胝体区域。在近场检测中，PCAM 尖端要与被测样品之间距离在亚波长范围内，需要精准控制距离，否则损坏针尖。2020 年，Li 等^[46] 搭建了一套光电导微探针近场太赫兹系统，可以在 0.17 s 采集到太赫兹波形，动态范围为 50 dB，空间分辨率为 3 μm ，比传统的太赫兹分辨率高 1~2 个数量级。如图 5 所示，实验对西瓜果肉细胞自然脱水过程中的形态进行了成像。从近场系统的实验对象可以看出，在无损、无标记的生物检测技术上，太赫兹近场有很大的应用前景，验证了其在植物细胞、动物细胞和细菌细胞的生理状态 (如正常或疾病)、亚细胞结构变化、生物活性和细胞异质性方面具有潜在的应用价值。

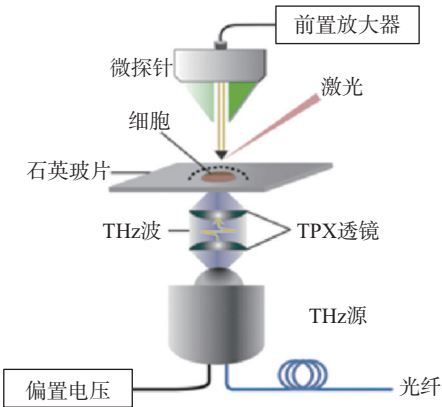


图 5 近场微探针光路图^[45]

Fig.5 Near-field microprobe optical path^[45]

3 太赫兹时域光谱成像技术的应用

太赫兹波的指纹光谱、低能性、高穿透性、宽光谱性、相干性等，在诸多领域都有很大的应用前景，如：生物医学领域^[47-49]、通信领域^[50-52]、无损检测领域^[53-55]、安检安防领域^[15, 56-58] 等。

在生物医学领域，一些生物分子以及 DNA 的转动能级和振动能级频率处在太赫兹波段，使得太赫兹波可以对某些生物体产生响应，对一些病理变化和疾病诊断进行检测。Chen 等^[4] 在对药物或癌症检测方向研究过程中，通过微腔元件探测体积微小的样品检测，来改善信噪比和提高灵敏度，并检测了多种药物的指纹谱。Chen 等^[59] 结合支持向量机 (support vector machine, SVM) 来检测角膜内皮损伤。Khani 等^[60] 使用手持扫描 THz-TDS 对烫伤和接触烧伤损伤进行检测。太赫兹不会造成细胞的电离反应，是将来对病理研究的重要手段。

在无损检测领域，对于古董、泡沫、陶瓷和高分子复合材料^[61] 等，红外光或超声波无法穿透进行缺陷检测，甚至还会损坏古董，而太赫兹不仅对大多数的非极性材料有高穿透性，还可以在非接触、非破坏情况下进行缺陷的检测。Feng 等^[54] 对云冈石窟空心化前后进行对比，利用飞行时间成像原理建立厚度模型进行检测，帮助进行文物保护。Yoo 等^[62] 和 Yim 等^[63] 分别对封装的半导体芯片进行二维和三维成像，可以清晰识别出其中的缺陷。

在安检安防领域，金属材料对太赫兹波具有很强的反射能力，这使太赫兹可用于机场、车站等地的安防。另外，毒品、爆炸物等物质在太赫兹波段有特定的吸收峰，对其光谱进行定性分析，从而检测出危险品。Huang 等^[64] 设计了一种线束扫描成像平台，对人体进行太赫兹成像，检测出了携带的枪支，这对未来安防检测有重要意义。

4 总结和展望

介绍了几种太赫兹时域光谱系统的成像方式，由二维成像到三维成像，由远场成像到近场成像。作为一个前沿的研究领域，太赫兹成像技术在生物医学、无损检测、通信领域、安检安防领域有巨大的应用潜力。表 1 给出了几种成像方

表 1 太赫兹成像对比

Tab.1 Terahertz imaging comparison

成像方式	横向分辨率	成像速度	信噪比/dB	优缺点分析	应用
平移台点扫描成像	亚毫米	~3 s/px	~90	信噪比高、成像范围原则不受限； 但机械扫描方式成像速度慢	
光束转向成像	亚毫米~毫米	~0.5 s/px ^[62]	~50	扫描速率快； 但图像边缘分辨率差	生物组织、光谱识别检测、危 化物检测、复合材料缺陷检 测、文物检测
光电导阵列成像	亚毫米	~2 帧/s ^[24]	~90	成像速度快，且具有较好的动态范围； 但系统复杂，器件成熟度低	
焦平面成像	亚毫米	~38 帧/s ^[16]	~20	可以实现整幅图像的实时成像；但信噪比低	
近场成像	微米 ^[46, 65]	~3 s/px ^[46]	~50	能够突破衍射极限获得微米级分辨率；但测试时探针需贴 近样品表面，探针易损，使用场景受限	生物组织、超表面、超材料

式的指标以及成像优缺点。

目前太赫兹时域光谱技术正处在从实验室到商业化的推广阶段，但依然面临一些挑战和局限。

a. 太赫兹辐射源能量较低，能检测的物体较薄。因为太赫兹波在穿透物质时会受到吸收和散射的影响，导致信号衰减和失真。因此，当前太赫兹时域光谱技术更偏向于检测薄层或表面的物理、化学和生物特性，而不是深层或体积的信息。

b. 整个系统的器件成本较高。太赫兹时域光谱技术需要使用高速激光器、高灵敏度探测器、精密延迟线等设备，这些设备都比较昂贵且难以集成。此外，太赫兹时域光谱技术还需要复杂的数据处理和分析方法，这也增加了系统的运行成本和维护难度。

c. 机械式的光学延迟线难以满足一些要求实时扫描的场所。太赫兹时域光谱技术需要延迟线来改变两束光之间的光程差，从而实现时间延迟。然而，机械扫描有其固有的速度限制和稳定性问题，导致扫描速度较慢且易受外界干扰。因此，在一些需要快速或动态成像的应用场景中，太赫兹时域光谱技术还不能满足需求。

尽管太赫兹时域光谱成像技术在商业应用上还面临着一些困难和挑战，但随着国内一些科研单位的不断努力，目前已经实现了太赫兹光谱系统的自主研发。这为太赫兹技术在国内的推广和应用提供了强有力的支撑和保障。随着科技的进步，太赫兹技术在未来必将取得更大的突破，并为社会和人类带来更多的福祉。

参考文献：

[1] MITTLEMAN D M. Twenty years of terahertz imaging [Invited][J]. [Optics Express](#), 2018, 26(8): 9417–9431.

[2] HEADLAND D, MONNAI Y, ABBOTT D, et al. Tutorial: terahertz beamforming, from concepts to realizations[J]. [APL Photonics](#), 2018, 3(5): 051101.

[3] JEPSEN P U, FISCHER B M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy[J]. [Optics Letters](#), 2005, 30(1): 29–31.

[4] CHEN L, LIAO D G, GUO X G, et al. Terahertz time-domain spectroscopy and micro-cavity components for probing samples: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(5): 591–607.

[5] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. [Optics Letters](#), 1995, 20(16): 1716–1718.

[6] ZIMDARS D, WHITE J S. Terahertz reflection imaging for package and personnel inspection[C]//*Proceedings of SPIE 5411, Terahertz for Military and Security Applications II*. Orlando: SPIE, 2004: 78–83.

[7] 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.

[8] JEN C Y, RICHTER C. Sample Thickness Measurement with THz-TDS: resolution and Implications[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35: 840–859.

[9] GUERBOUKHA H, NALLAPPAN K, SKOROBOGATIY M. Toward real-time terahertz imaging[J]. [Advances in Optics and Photonics](#), 2018, 10(4): 843–938.

[10] WOODWARD R M, COLE B E, WALLACE V P, et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2002, 47(21): 3853–3864.

[11] KATLETZ S, PFLEGER M, PÜHRINGER H, et al. Efficient terahertz en-face imaging[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(23): 23042–23053.

[12] OK G, PARK K, CHUN H S, et al. High-performance sub-terahertz transmission imaging system for food inspection[J]. [Biomedical Optics Express](#), 2015, 6(5): 1929–1941.

[13] YEE D S, JIN K H, YAHNG J S, et al. High-speed terahertz reflection three-dimensional imaging using beam

- steering[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5027–5034.
- [14] HARRIS Z B, VIRK A, KHANI M E, et al. Terahertz time-domain spectral imaging using telecentric beam steering and an f - θ scanning lens: distortion compensation and determination of resolution limits[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26612–26622.
- [15] HARRIS Z B, KHANI M E, ARBAB M H. Terahertz portable handheld spectral reflection (PHASR) scanner[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 228024–228031.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] CHEFONOV O V, OVCHINNIKOV A V, AGRANAT M B, et al. Terahertz beam spot size measurements by a CCD camera[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4099–4102.
- [20] PRADARUTTI B, MÜLLER R, FREESE W, et al. Terahertz line detection by a microlens array coupled photoconductive antenna array[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18443–18450.
- [21] BRAHM A, SCHARNOWSKI S, PRADARUTTI B, et al. 128 channel THz ultrashort pulse system[C]//LEO/Europe - EQEC 2009 - European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference. Munich: IEEE, 2009: 978–979.
- [22] YARDINCI N T, LU H, JARRAHI M. High power telecommunication-compatible photoconductive terahertz emitters based on plasmonic nano-antenna arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(19): 191103.
- [23] ALONSO-DELPINO M, RECK T, JUNG-KUBIAK C, et al. Development of silicon micromachined microlens antennas at 1.9 THz[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(2): 191–198.
- [24] BRAHM A, WILMS A, DIETZ R J B, et al. Multichannel terahertz time-domain spectroscopy system at 1030 nm excitation wavelength[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 12982–12993.
- [25] LI X R, JARRAHI M. A 63-pixel terahertz focal-plane array for terahertz time-domain spectroscopy and imaging[C]//2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Buffalo: IEEE, 2020.
- [26] HENRI R, NALLAPPAN K, PONOMAREV D S, et al. Fabrication and characterization of an 8×8 terahertz photoconductive antenna array for spatially resolved time domain spectroscopy and imaging applications[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 117691–117702.
- [27] MITTLEMAN D M, HUNSCHE S, BOIVIN L, et al. T-ray tomography[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 904–906.
- [28] YASUDA T, IWATA T, ARAKI T, et al. Improvement of minimum paint film thickness for THz paint meters by multiple-regression analysis[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7518–7526.
- [29] KRIMI S, KLIER J, JONUSCHEIT J, et al. Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(2): 021105.
- [30] DONG J L, LOCQUET A, CITRIN D S. Depth resolution enhancement of terahertz deconvolution by autoregressive spectral extrapolation[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1828–1831.
- [31] ZHAI M, LOCQUET A, ROQUELET C, et al. Thickness characterization of multi-layer coated steel by terahertz time-of-flight tomography[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102358.
- [32] ABRAHAM E, YOUNUS A, AGUERRE C, et al. Refraction losses in terahertz computed tomography[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(10): 2050–2055.
- [33] JEWARIYA M, ABRAHAM E, KITAGUCHI T, et al. Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2423–2433.
- [34] PERRAUD J B, OBATON A F, BOU-SLEIMAN J, et al. Terahertz imaging and tomography as efficient instruments for testing polymer additive manufacturing objects[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3462–3467.
- [35] TRIPATHI S R, SUGIYAMA Y, MURATE K, et al. Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6433–6440.
- [36] FOSODEDER P, VAN FRANK S, RANKL C. Highly accurate THz-CT including refraction effects[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3684–3699.
- [37] HUNSCHE S, KOCH M, BRENER I, et al. Thz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1/6): 22–26.
- [38] MITROFANOV O, LEE M, HSU J W P, et al. Terahertz pulse propagation through small apertures[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(7): 907–909.
- [39] CHEN Q, JIANG Z P, XU G X, et al. Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(15): 1122–1124.
- [40] CHEN Q, ZHANG X C. Semiconductor dynamic aperture for near-field terahertz wave imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4): 608–614.
- [41] LECAQUE R, GRÉSILLON S, BARBEY N, et al. THz near-field optical imaging by a local source[J]. *Optics Communications*, 2006, 262(1): 125–128.
- [42] LIU S C, MITROFANOV O, NAHATA A. Near-field

terahertz imaging using sub-wavelength apertures without cutoff[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2728–2736.

[43] WANG N, ZHANG X X, LIANG J, et al. Novel configuration of aperture-type terahertz near-field imaging probe[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2020, 53(29): 295102.

[44] WANG N, CHANG T Y, CUI H L. Nondestructive inspection of packaged microcircuits by aperture-type terahertz near-field imaging[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2022, 55(18): 185105.

[45] GENG G S, DAI G B, LI D D, et al. Imaging brain tissue slices with terahertz near-field microscopy[J]. *Biotechnology Progress*, 2019, 35(2): e2741.

[46] LI Z X, YAN S H, ZANG Z Y, et al. Single cell imaging with near-field terahertz scanning microscopy[J]. *Cell Proliferation*, 2020, 53(4): e12788.

[47] KNOBLOCH P, SCHILDKNECHT C, KLEINE-OSTMANN T, et al. Medical THz imaging: an investigation of histo-pathological samples[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2002, 47(21): 3875–3884.

[48] HINTZSCHE H, JASTROW C, HEINEN B, et al. Terahertz radiation at 0.380 THz and 2.520 THz does not lead to DNA damage in skin cells *in vitro*[J]. *Radiation Research*, 2013, 179(1): 38–45.

[49] OUCHI T, KAJIKI K, KOIZUMI T, et al. Terahertz imaging system for medical applications and related high efficiency terahertz devices[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(1): 118–130.

[50] CANG L, ZHAO H K, ZHENG G X. The impact of atmospheric turbulence on terahertz communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 88685–88692.

[51] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371–379.

[52] SONG H J, LEE N. Terahertz communications: challenges in the next decade[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, 12(2): 105–117.

[53] WANG J, ZHANG J, CHANG T Y, et al. Terahertz nondestructive imaging for foreign object detection in glass fibre-reinforced polymer composite panels[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 36–44.

[54] FENG J, MENG T H, LU Y H, et al. Nondestructive testing of hollowing deterioration of the Yungang grottoes based on THz-TDS[J]. *Electronics*, 2020, 9(4): 625.

[55] AMENABAR I, LOPEZ F, MENDIKUTE A. In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(2): 152–169.

[56] WANG J, LIANG X D, CHEN L Y, et al. First demonstration of airborne MIMO SAR system for multimodal operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5204113.

[57] ZHANG Y F, ZHANG S F, SUN X L. Novel operating band design schemes for high-contrast passive terahertz security screening systems[J]. *Journal of Modern Optics*, 2021, 68(11): 579–586.

[58] SONG Q, ZHAO Y J, REDO-SANCHEZ A, et al. Fast continuous terahertz wave imaging system for security[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(10): 2019–2022.

[59] CHEN A, HARRIS Z B, VIRK A, et al. Assessing corneal endothelial damage using terahertz time-domain spectroscopy and support vector machines[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9071.

[60] KHANI M E, HARRIS Z B, OSMAN O B, et al. Supervised machine learning for automatic classification of in vivo scald and contact burn injuries using the terahertz portable handheld spectral reflection (PHASR) scanner[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5096.

[61] OH G H, JEONG J H, PARK S H, et al. Terahertz time-domain spectroscopy of weld line defects formed during an injection moulding process[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 157: 67–77.

[62] YOO H, KIM J, AHN Y H. High-speed THz time-of-flight imaging with reflective optics[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 873.

[63] YIM J H, KIM S Y, KIM Y, et al. Rapid 3D-imaging of semiconductor chips using THz time-of-flight technique[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4770.

[64] HUANG H C, LIU Q, ZOU Y, et al. Line beam scanning-based ultra-fast THz imaging platform[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(1): 184.

[65] SEO C, KIM T T. Terahertz near-field spectroscopy for various applications[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2022, 81(6): 549–561.

(编辑: 董 伟)