

太赫兹成像技术及其应用

王与焯^{1,2*}, 李海滨^{1,2}, 葛梅兰^{1,2}, 徐德刚^{1,2**}, 姚建铨^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072;

²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 太赫兹 (THz) 波是频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波, 具有低能性、宽带性、指纹光谱、对水敏感等特点。随着太赫兹技术的发展, 太赫兹成像技术在生物医学诊断、无损检测和安检等领域表现出许多独特的优点, 得到了越来越广泛的关注。主要概述目前常用的太赫兹成像技术, 详细介绍脉冲太赫兹成像技术、连续太赫兹成像技术、太赫兹近场成像技术及太赫兹实时成像技术的发展现状, 并介绍太赫兹成像技术在安全检查、无损检测和生物医学领域的典型应用, 最后对太赫兹成像技术的未来发展进行展望。

关键词 太赫兹波; 太赫兹成像; 远场成像; 近场成像; 实时成像

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231433

Terahertz Imaging Technology and Its Application

Wang Yuye^{1,2*}, Li Haibin^{1,2}, Ge Meilan^{1,2}, Xu Degang^{1,2**}, Yao Jianquan^{1,2}

¹The Institute of Laser and Opto-Electronics, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Terahertz (THz) wave is electromagnetic wave in the frequency range of 0.1–10 THz, which has the characteristics of low energy, broadband, fingerprint spectrum, and sensitivity for water. With the development of THz technology, THz imaging technology has shown many unique advantages in the fields of biomedical diagnosis, nondestructive testing, and security inspection, and has gained more and more widespread attention. This paper mainly overviews the common THz imaging techniques. The imaging principles and research progresses of pulsed THz imaging technology, continuous THz imaging technology, THz near-field imaging technology, and THz real-time imaging technology are introduced in detail, respectively. The typical applications of THz imaging technology in the fields of security inspection, nondestructive testing, and biomedicine are also introduced. Furthermore, the future development of THz imaging technology is prospected.

Key words terahertz wave; terahertz imaging; far-field imaging; near-field imaging; real-time imaging

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率为 0.1~10 THz (1 THz=10¹² Hz), 波长在 3 mm~30 μm 范围内的电磁波。其具有诸多优点: 低光子能量, 不会对生物组织造成电离损伤; 许多生物大分子在此频段表现出强烈的吸收和谐振, 因此显示出物质的“指纹谱”特性; 能够穿透非金属、非极性物质; 对水分具有敏感的吸收特性。因此, THz 技术在生命科学、通信技术及物理科

学等领域具有广阔的应用前景。

THz 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, 又可以通过数字信号处理和频谱分析等方法对物质的 THz 光谱响应特性进行分析, 目前已成为 THz 技术最重要的应用之一。随着 THz 波谱检测技术的飞速发展, 各种原理和结构的 THz 成像技术被不断提出和研究。根据成像系统中辐射源的不同, THz 成像技术可以分为脉冲 THz 成像技术和连续 THz 成像技术。其中, 连续 THz 成像技术

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-06-10; 录用日期: 2023-08-10; 网络首发日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金 (U22A20353, 62175182, 62275193)

通信作者: *yuyewang@tju.edu.cn; **xudegang@tju.edu.cn

结构较简单且成像速度较快,但这种成像方式只能获得样品的强度信息;而基于时域光谱的脉冲 THz 成像技术虽然较复杂,但可获得样品的振幅、相位、折射率和介电常数等光学参数。随着 THz 辐射源和探测装置不断发展,THz 成像技术在成像速度、成像分辨率、成像维度和成像灵敏度等方面都有了较高的提升。在成像速度方面,成像方式由最初的逐点扫描逐渐向线阵扫描^[1]和面阵扫描^[2]方面发展,后又衍生了基于面阵扫描的快速重构技术,在此基础上,振镜^[3]、基于振镜和多面转镜设计的 $f-\theta$ 扫描装置^[4]和光栅^[5]等一系列提高成像速度的技术方法被报道。为了在保持较高成像分辨率的同时进一步提高成像速度,基于压缩感知的 THz 成像技术^[6-7]被提出,该技术突破了采样定理的限制,实现了高速的 THz 成像与重构,为实现高性能成像提供了思路。成像分辨率是决定成像能力的重要指标。由于 THz 波的波长较长,受衍射极限的限制,传统的成像方式无法获得较高的成像分辨率,为了突破衍射极限,发展了基于微米量级的孔径装置或微纳结构材料的 THz 近场成像技术,这种成像方式能够突破衍射极限,获得亚波长分辨图像,但是近场成像需要设计精细微结构,增大了实验难度,且其聚焦光斑较小,需设置较小的成像步长,但会导致成像时间较长。因此,Chernomyrdin 等^[8]利用高折射率材料制成的固体浸没透镜,通过增加系统的数值孔径来提高系统的成像分辨率,该方法较简单易实现,为实现高分辨率成像提供了新的研究方向。成像灵敏度是影响成像质量的关键因素。为了提高成像灵敏度,基于倏逝波 (evanescent wave) 的 THz 衰减全反射 (THz-ATR) 成像技术被提出^[9],这种成像方式适用于液体样品测量,拓宽了 THz 波成像技术的应用领域。除此之外,THz 偏振成像^[10]、纳米颗粒辅助的 THz 成像^[11]、基于穿透增强辅助试剂的 THz 成像^[12]、基于频率上转换探测的 THz 成像^[13]等多种成像技术相继被报道。

本文对 THz 成像技术的发展现状进行综述,分别从脉冲 THz 成像技术、连续 THz 成像技术、THz 近场成像技术及 THz 实时成像技术 4 个方面进行介绍,总结了多种 THz 成像技术的发展历程和技术路线,从成像方式、成像速度、成像分辨率和适用场景等多个角度分析并归纳了各种 THz 成像技术的优势与不足,并介绍了 THz 成像技术在安全检查、无损检测及生物医学领域的应用。最后,讨论并展望了 THz 成像技术的未来发展趋势。

2 太赫兹成像技术

与其他波段的电磁辐射一样,THz 波可以对物体进行成像,并且 THz 波具有高穿透性、低能性等特性,因此在成像方面 THz 波段比其他波段更具优势。THz 成像的基本原理是:THz 波照射待测样品,通过分析待测样品的透射信号或反射信号中包含的信息

(振幅、相位或强度信息),从而得到样品的 THz 图像。随着 THz 辐射源和探测技术的发展,多种不同模式的 THz 成像技术被逐渐提出和研究,主要包括脉冲 THz 成像技术、连续 THz 成像技术、THz 近场成像技术和 THz 实时成像技术。

2.1 脉冲太赫兹成像

脉冲 THz 成像技术的基本原理是:THz 脉冲经检测目标后,探测脉冲的时域光谱并对其进行傅里叶变换,从而获取检测目标的频域光谱信息,进一步可以分析 THz 波与检测目标作用后的强度和相位信息。通过在脉冲 THz 成像系统中设置一个移动平台,利用移动平台对检测目标进行扫描控制,同时对透射或反射的 THz 时域信号进行同步数据采集,在每个位置获得的时域信号即为脉冲 THz 成像的像素信息,后期对其进行频谱分析,可以获得强度和相位信息,最后进行重构得到对应强度或者相位图像。因此,脉冲 THz 成像具有信噪比较高的优点。

1995 年,美国贝尔实验室的 Hu 和 Nuss^[14]搭建了第一套基于 THz 时域光谱 (THz-TDS) 系统的二维透射式 THz 光谱成像系统,通过算法提取了样品的相位和振幅信息,实现了对树叶和芯片的逐点扫描成像,该系统的光路与实验结果如图 1 所示。2001 年,Löffler 等^[15]首次采用透射式 THz-TDS 系统实现对犬皮肤癌组织的 THz 成像检测。自此,透射式 THz 成像技术用于生物组织病灶研究得到了科研工作者的广泛关注。

随着 THz 产生技术的不断发展,从最初通过光电导^[16-17]或光整流^[18]的方式获得宽带 THz 脉冲,发展出了使用聚焦的飞秒激光将焦点位置处的空气电离,形成空气等离子体,再利用其中的光学非线性效应产生 THz 脉冲信号的新方式^[19]。

为了进一步提高成像系统信噪比,2001 年,Johnson 等^[20]搭建了反射式脉冲 THz 成像系统,该系统通过引入相位转换技术,大大提升了信噪比和深度分辨率,从而极大地改善了成像效果,系统分辨能力可达相干长度的 2%。2008 年,Banerjee 等^[21]搭建了脉冲 THz 扫描成像系统,利用 THz 波对纸张中水分变化较为敏感而对纤维的散射不敏感这一特性,对纸张中的含水量进行检测,检测结果具有较高精度。然而,这种传统的 THz-TDS 扫描成像系统不仅分辨率较低,且需要通过获得样品每个位置的整个时域光谱信息进行成像,这导致成像时间较长,成像质量较差。针对这一问题,Yasui 等^[22]提出了脉冲焦线成像系统,其光路如图 2(a) 所示。THz 波通过柱透镜会聚成一条焦线,其通过样品后经过一个球透镜和另一个柱透镜准直为平行光。在探测光路中,扩束后的探测光始终与探测晶体保持相对垂直,并与 THz 波非共线重合,不同重合区域对应不同的时间延迟。探测晶体对 THz 信号进行光电采样,并由 CMOS 相机获取 THz 图像,这大大缩短了成像时间。2010 年,Schirmer 等^[23]使用脉冲

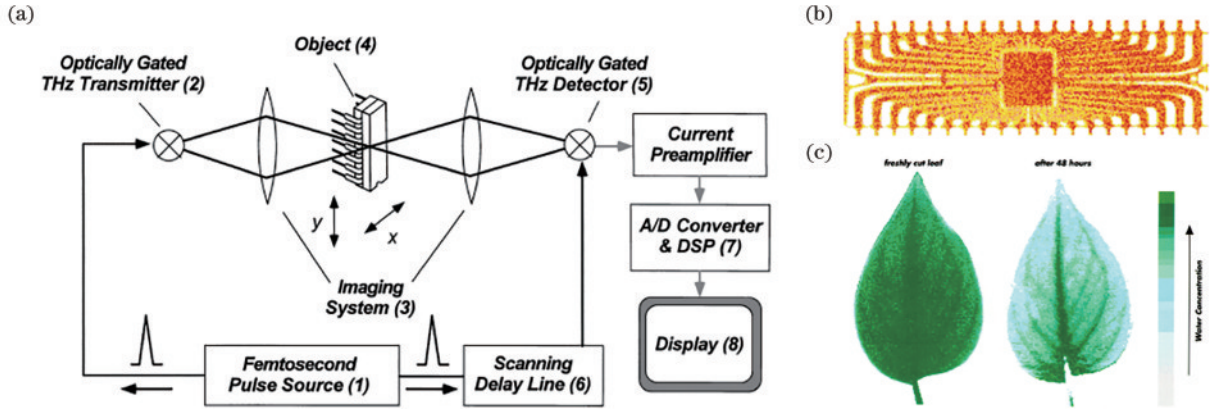


图 1 基于 THz-TDS 的成像系统及其应用^[14]。(a) 基于 THz-TDS 系统的二维透射式 THz 光谱成像系统示意图；(b) 塑料包装的半导体集成电路的 THz 图像；(c) 新鲜叶片的 THz 图像

Fig. 1 Imaging system based on THz-TDS and its application^[14]. (a) Schematic of a two-dimensional transmission THz spectral imaging system based on THz-TDS system; (b) THz image of a semiconductor integrated circuit packaged by plastics; (c) THz image of a fresh leaf

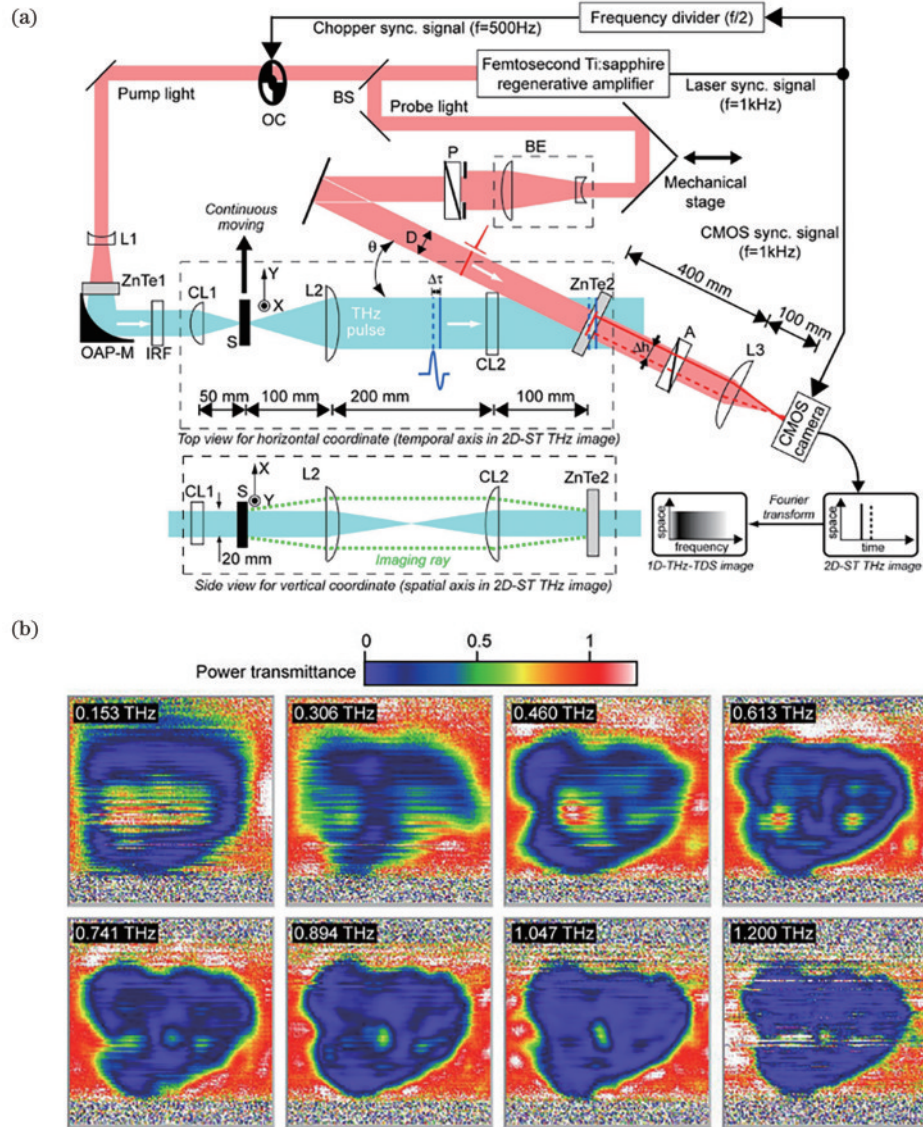


图 2 脉冲 THz 成像系统及其应用。(a) 脉冲 THz 焦线成像系统示意图^[22]；(b) 牙齿组织的 THz 光谱图像^[23]

Fig. 2 Pulsed THz imaging system and its application. (a) Schematic of pulsed THz wave focal line imaging system^[22]; (b) THz spectral images of tooth sample^[23]

THz 焦线成像技术对牙齿等组织进行了成像检测,成像结果如图 2(b)所示,实验证明此系统在生物检测中具有良好的效果。

为了进一步拓展脉冲 THz 成像技术的应用领域,2013 年, Wojdyla 等^[9]基于高阻硅棱镜搭建了点扫描脉冲 THz-ATR 成像系统,如图 3 所示。实验中将 ATR 棱镜固定,将可移动垫片置于棱镜上方并与棱镜紧密接触,利用将样品置于垫片上并逐点移动垫片的方式使 THz 波在样品表面发生衰减全反射,实现了对青蛙组织的 THz 扫描成像。此系统可避免点扫描成像过程中光路变化导致成像分辨率发生改变的缺陷。该系统为液相环境中活细胞或细菌等液体样品的 THz 成像提供了可能性。

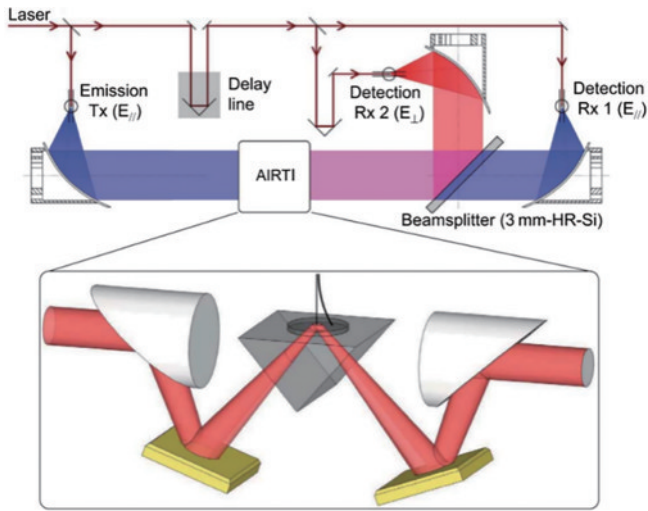


图 3 基于 THz-TDS 的 THz-ATR 成像系统示意图^[9]

Fig. 3 Schematic of THz-ATR imaging system based on THz-TDS^[9]

为了进一步获取样品内部的细节信息,偏振成像作为一种新型成像技术在近几年得到迅速发展,其不仅可以像强度成像一样对样品进行强度信息的表征识别,同时还可以获取被测样品的偏振信息,并在原有图像基础上进行数字图像处理、增强和融合,最终得到可视化的偏振图像,根据偏振图像对目标特征进行提取。这种成像方法能够有效消除背景噪声,提高图像对比度,提升成像系统对待测样品的检测识别能力。2010 年,Zhang 等^[24]将石英晶体作为偏振敏感器件,利用其对两个 THz 偏振分量的时间延迟不同这一特性,对绝缘泡沫塑料的偏振信息进行测量。2017 年,Moriwaki 等^[25]利用 THz-TDS 系统对黑色橡胶的偏振信息进行测量,根据样品厚度以及穿过样品的 THz 波正交分量之间的振幅和相位差,确定样品的双折射程度和慢光轴角度,并利用蒙特卡罗模拟将样品的双折射数据转换为样品内部应变的数量和方向,进而将样品的双折射特性与其变形程度相关联,实现对可见不透明黑色橡胶内部三轴应变的无损成像。为了在获取偏振信息

的同时提高成像分辨率,2018 年,上海理工大学的 Zang 等^[26]基于超表面波前调控原理,设计了手性依赖的超表面结构,并结合相干效应将聚焦的等离激元发射至自由空间,形成了单频点偏振可控且突破衍射极限的 THz 超聚焦光斑,半峰全宽(FWHM)约为 0.38λ ,如图 4(a)~(d)所示,该透镜有望实现 THz 超分辨成像。在此基础上,2019 年,该团队^[27]设计了偏振可控的 THz 超构表面透镜,如图 4(e)~(g)所示,通过理论仿真和实验同时验证了该透镜同时拥有聚焦和偏振调控功能,能够将沿 x 轴偏振方向入射的 THz 波聚焦成沿 y 轴偏振方向的光斑,并实现了偏振可控的高分辨 THz 成像检测功能。

2.2 连续太赫兹成像

连续 THz 成像技术的基本成像原理是:在对检测目标进行 THz 成像时,检测目标内部的结构对入射的 THz 波具有吸收、反射和散射等效应,会影响 THz 波传输过程中电磁场的强度,从而导致 THz 波强度发生变化,不同位置探测到的强度构成的数据阵列即构成了检测目标的 THz 图像。因此,连续 THz 成像的实质是一种强度成像。通过测量样品不同位置的 THz 强度信号获得成像像素,进而像素显示为不同颜色或明暗来反映物体的形状、缺陷或其他信息。连续 THz 成像系统通常采用输出功率较高的 THz 辐射源进行成像。当采用频率较高的 THz 辐射源进行成像时,其成像分辨率和信噪比较高,并且还具备结构紧凑简单、成像速度快等优点。根据成像方式不同,可以将 THz 扫描成像分为透射成像、反射成像和衰减全反射成像。

在各种成像模式中,透射式 THz 扫描成像最早被研究和实现。与其他 THz 成像模式相比,透射式 THz 扫描成像作用机理相对简单,采用有无样品信号之比直接获得样品透过率。因此,透射式扫描成像方式对样品厚度有所要求,对于对 THz 波吸收较小的样品,可直接将待测样品置于检测光路中进行成像;对于对 THz 波吸收较大的样本,如生物样本,需进行切片处理。由于 THz 光束在样品表面具有正入射性,通过扫描探测能够得到样品另一侧的强度信息。2005 年,美国伦斯勒理工学院 THz 实验室^[28]率先研发出了连续 THz 成像系统。2006 年,Gompf 等^[29]提出了基于固体浸没透镜技术的透射式连续 THz 成像系统,系统分辨率可达 $310\ \mu\text{m}$,实现了对树叶和石蜡包埋的狗的食道癌的 THz 成像,为连续 THz 成像技术开辟了一条新道路。

2017 年,Qin 等^[30]采用工作频率为 900 GHz 的 THz 辐射源(DET-900 GHz)搭建了透射式连续 THz 逐点扫描成像系统,系统光斑尺寸约为 6 mm,分别对热丝电阻、隐藏在信封中的刀片、银行卡和树叶进行了扫描成像,分别获得了不同样品内部的图像信息。2018 年,本课题组^[31]采用工作频率为 2.52 THz 的连续 THz 气体激光器搭建了透射式连续 THz 扫描成像

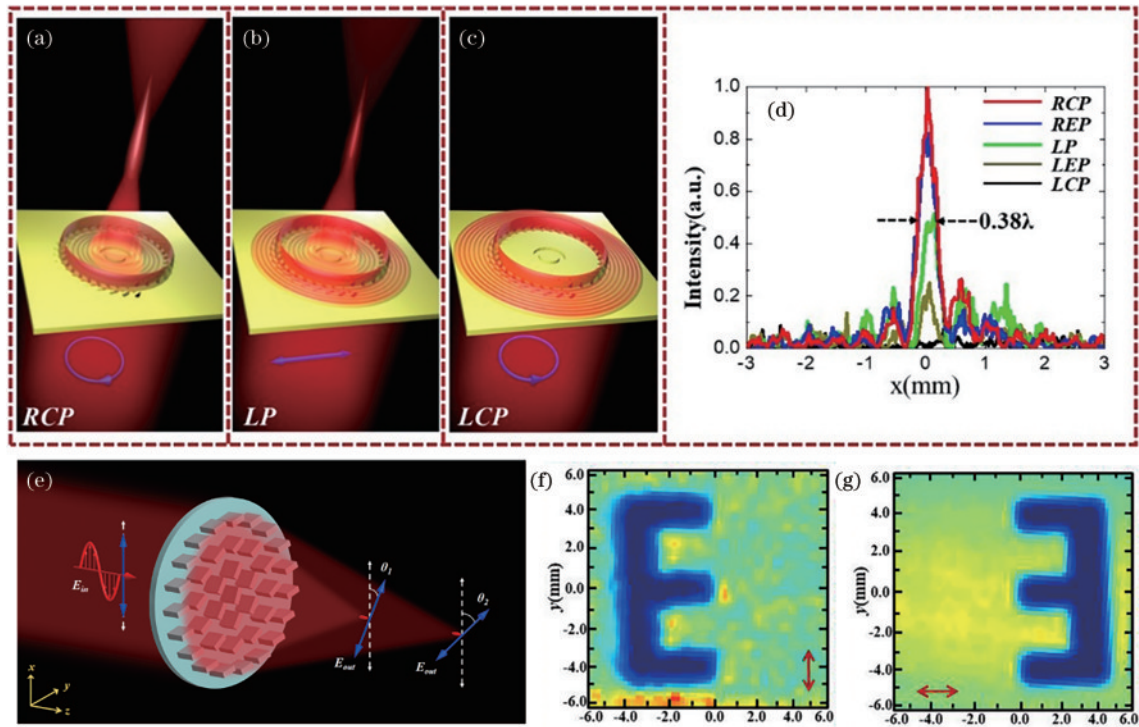


图 4 THz 偏振成像。(a)~(c)右旋偏振光、线偏振光和左旋偏振光照射下的 THz 超聚焦^[26]；(d)不同偏振下 THz 波的超聚焦光斑沿 x 轴的归一化分布^[26]；(e)具有偏振旋转功能的多焦点超表面透镜示意图^[27]；(f)~(g)样品在不同焦点处的 THz 高分辨图像^[27]
 Fig. 4 THz polarization imaging. (a)~(c) THz super-focusing under the illumination of right-hand polarization (RCP) light, linear polarization (LP) light, and left-hand polarization (LCP) light^[26]; (d) normalized distribution of superfocal spot along the x -axis of THz waves under different polarizations^[26]; (e) schematic of a multifocal metasurface lens with polarization rotation function^[27]; (f)~(g) THz high-resolution images of samples at different focal points^[27]

系统,并对厚度为 $40\ \mu\text{m}$ 的新鲜大鼠脑组织进行了扫描成像,如图 5 所示,首次实现了连续 THz 成像系统在脑创伤组织检测中的应用,该系统成像分辨率达 $260\ \mu\text{m}$ 。在此基础上,本课题组^[32]首次将形态学重构技术应用于 THz 成像,通过提高峰值信噪比 (PSNR) 和抑制重

建图像的背景噪声,获得了能够清晰识别大鼠脑组织边界的 THz 图像。2018 年,本课题组^[33]利用透射式连续 THz 扫描成像系统对 4 种细菌的菌落进行成像,通过观察不同菌落对 THz 吸收的差异,可以根据 THz 图像直接对各个菌落进行区分。

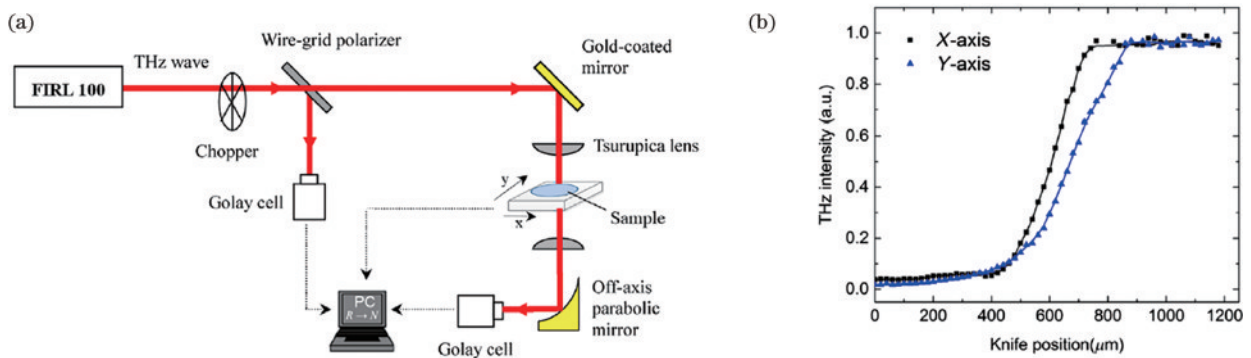


图 5 连续 THz 透射成像^[31]。(a) 透射式 THz 波成像系统示意图；(b) 刀口法测量成像系统分辨率
 Fig. 5 Continuous THz transmission imaging^[31]. (a) Schematic of THz transmission imaging system; (b) resolution of the imaging system measured by knife-edge method

透射成像存在无法保证样本完整性的缺点,且样品制备难度较大,因此反射成像被提出。2003 年, Zhang 等搭建了第一套小型化连续 THz 反射成像系统,迈开了反射式连续 THz 成像技术研究的步伐^[34]。2004 年, Darmo 等^[35]首次报道了 THz-QCL 搭建的反

射式连续 THz 成像系统,并基于该系统开展了石蜡包裹的大鼠脑切片的成像实验,THz 图像中的大鼠脑部细节清晰可辨。2018 年, Chernomyrdin 等^[8]通过将固体浸没透镜技术应用于反射式 THz 成像系统,有效提升了成像分辨率。与透射式系统不同,反射式系统可

以精确地调整固体浸没透镜的位置,从而使焦点精准聚焦在像面上,将成像系统分辨率进一步提升至 $0.15\lambda\sim 0.3\lambda$ 。为了避免物体表面不平整或具有一定倾斜角造成的 THz 图像不均匀问题,Chernomyrdin 等^[8]设计了一个半球透镜,使 THz 波在与组织接触的硅透镜表面发生全反射,样品成像窗口和半球透镜均采用高阻硅制成,样品成像窗口与透镜之间的空气隙不会对成像质量产生影响,如图 6 所示。在该系统中,当入射角度较小时,光束在样品和硅透镜的接触面一部分发生透射,一部分发生反射;当 THz 光斑较大、入射角在全反射临界角附近时,探测器接收到的是反射信号与全反射信号的混合信号。因此无法通过这种方式准确获取被测样品的光学参数。

基于倏逝波的 ATR 成像可降低生物组织形貌和体液对 THz 检测灵敏度的影响,有望实现术中原位成像。ATR 模式在 THz 光谱检测方面已经历了长期的发展,已普遍用于细胞和病变组织的检测。然而 THz-ATR 成像技术的研究起步较晚。2010 年, Gerasimov 等^[36]将自由电子激光器作为辐射源,首次搭建了 THz-ATR 成像系统,该系统采用热辐射阵列探测器对酒精滴入水的过程进行了实时成像,证明了 ATR 模式用于 THz 成像的可能性。2017 年,本课题组^[37]首次搭建了基于垂直点扫描的连续 THz-ATR 成像系统,该系统采用光泵浦 THz 气体激光器和在室温工作的 Goly Cell 分别作为 THz 辐射源和探测器,成像系统分辨率达 $578\ \mu\text{m}$,这也是首次报道的高分辨率 THz-ATR 成

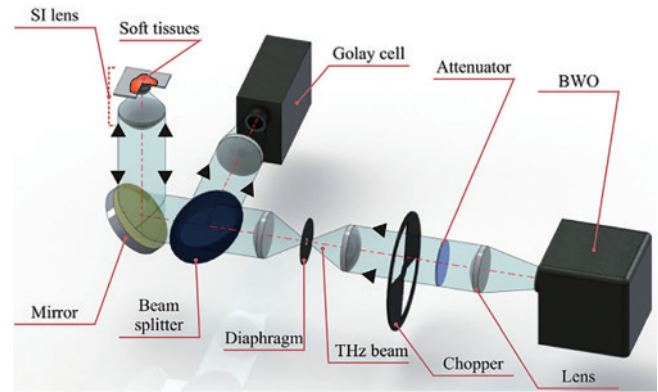


图 6 基于固体浸没透镜的反射式连续 THz 成像系统示意图^[8]
Fig. 6 Schematic of continuous reflective THz imaging system based on solid immersion lens^[8]

像。进一步,实验发现 p 偏振 THz 波可获得稳定的样品反射信号和高对比度成像,并实现猪肉中脂肪和肌肉组织的明显区分。在此基础上,本课题组^[38]对该成像系统进行了优化研究,采用水平点扫描的方式进行成像,避免了全反射棱镜内部二次反射和棱镜偏转对成像结果的影响,通过使用底角在 31° 以下的 ATR 棱镜和 p 偏振的 THz 波,将成像误差降至最小。2021 年,本课题组^[39]通过理论研究成像角度对 THz 反射信号和 ATR 穿透深度的影响,获得了适用于反射和 ATR 成像的 THz 波成像角度,通过反射窗口和 ATR 棱镜快速切换的方式,实现了共光路连续 THz 反射和 ATR 双模式成像,如图 7 所示。

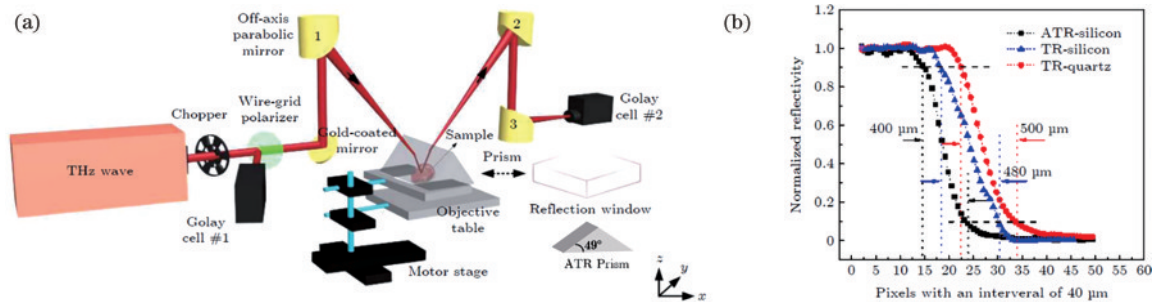


图 7 THz 反射及衰减全反射成像^[39]。(a) 共光路连续 THz 反射和 ATR 成像系统示意图;(b) 采用石英和高阻硅材料制成的成像窗口时,连续 THz 反射和 ATR 成像系统的分辨率

Fig. 7 THz reflection and ATR imaging^[39]. (a) Schematic of common path continuous THz reflection and ATR imaging system; (b) resolution of continuous THz reflection and ATR imaging system when using imaging windows made of quartz and high resistance silicon materials

2.3 太赫兹近场成像

由于 THz 波的波长较长,成像受到衍射极限限制,无法满足高精度测量要求。为了进一步利用 THz 成像技术探究微纳尺度下的科学问题,提高 THz 成像的分辨率是十分必要的。THz 近场成像技术是突破传统 THz 成像技术衍射极限、获得更高空间分辨率的有效方式。传统 THz 成像技术探测传播信号时,亚波长尺度细节信息在传播信号中占比很小,且随着传播距离的增加而迅速衰减,因此传统 THz 成像技术无法对亚波长

尺度细节信息进行检测。近场成像通过获取并利用 THz 电磁场中的隐矢波来实现衍射极限的突破,并通过局域增强或增透来实现成像性能的进一步提升。目前实现 THz 近场成像的技术方法主要有基于亚波长尺寸孔径的 THz 近场成像技术^[40-41]、亚波长尺寸针尖局域增强 THz 近场成像技术^[42-54]、亚波长聚焦的 THz 近场显微成像技术^[46-50]、基于微纳结构材料制成的 THz 超透镜的 THz 近场成像技术^[51-54]等。本文主要对样品与针尖耦合系统的相互作用及其对 THz 探测信号

的影响、探针尺寸结构的设计、THz 波经微孔衍射和微纳结构传输及调控等过程的模型建立等内容开展研究。

1998 年, Hunsche 等^[55]利用 THz 波对高阻硅基底上的金线结构进行成像, THz 波经铝制探针锥形尖端通光孔径局域后近场照明样品, 首次实现了 THz 波段的近场成像, 利用波长为 220 μm 的 THz 波得到了 50 μm 的图像分辨率, 如图 8(a) 所示。该系统基于物理孔径进行近场成像, 其分辨率取决于局域孔的尺寸, 同时受人射波偏振状态的影响。因此这种方式存在截止效率低和孔径透过率小两个缺陷, 限制了探测带宽、灵敏度和信噪比。针对上述问题, 2000 年, Chen 等^[56]首次提出了动态孔径的近场成像方式, 如图 8(b) 所示, 飞秒激光经半导体材料激发光生载流子, 形成动态孔径, 其中动态孔径的产生及尺寸与聚焦透镜的位置有关, 而孔径厚度则与半导体材料的吸收深度有关。

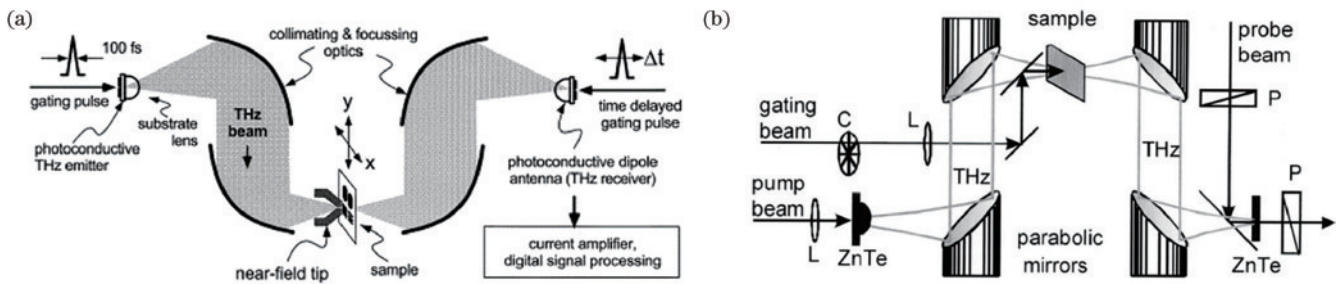


图 8 基于孔径的 THz 近场成像。(a) 物理孔径型 THz 近场成像^[55]; (b) 动态孔径型 THz 近场成像^[56]

Fig. 8 Aperture-based THz near-field imaging. (a) Physical aperture-based THz near-field imaging^[55]; (b) dynamic aperture-based THz near-field imaging^[56]

基于针尖的成像方式也是 THz 近场成像的重要组成部分, THz 波通过照射亚波长尺寸的针尖形成局部 THz 电场, 通过对样品进行近场照明得到带有样品细节信息的隐矢波, 针尖对隐矢波进行耦合并转化为传播波, 由探测器在远场对其探测。2003 年, Chen 等^[59]基于针尖散射的无孔扫描近场成像理论, 实现了针尖扫描的 THz 近场成像, 在 2 THz 处实现了 150 nm 的分辨率, 表明了 THz 近场成像技术对生物样品进行细胞水平成像或对单个亚微米半导体器件进行成像检测的可行性。在此基础上, Moon 等^[43]使用原子力显微镜来控制针尖与样品表面之间的距离, 利用宽带脉冲 THz 波对内嵌在介质膜层中的金属光栅进行近场成像, 获取其亚表面信息, 如图 9 所示, 该成像系统在 1 THz 处实现了 90 nm 的横向分辨率。此方法可以避免 THz 波经微孔时的损耗, 并在一定程度上存在针尖增强效应, 对探测生物纳米分子的低能光与物质的相互作用机制具有重要的意义。

在 THz 近场成像技术中, 探针的制作、针尖与样品之间的距离控制、成像光路的设计与搭建等均存在一定的复杂性, 操作要求较高; 虽然可以通过使用原子力显微镜等来降低操作难度, 但成本较高; 同时, 受限于半

THz 超透镜是一种基于各种超材料设计的平面

因此, 这种方法能够避免基于物理孔径的近场成像中波导效应导致的探测带宽减小这一问题。然而, 由于动态孔径的产生受到半导体材料的影响, 因此探测信号的强度仍受到孔径局域的限制。2020 年, Chen 等^[57]采用自旋电子 THz 发射阵列取代半导体晶片, 实现了深亚波长分辨率的 THz 鬼成像。2022 年, 首都师范大学 Wang 等^[58]利用空气等离子体动态孔径实现 THz 近场成像, 通过对一对正交传播的激光进行聚焦, 在焦点附近产生了两个重叠的空气等离子体, 形成了“十字灯丝”。将 THz 光束引入“十字灯丝”的中心区域, 提取仅由“十字灯丝”中心区域调制的 THz 信号, 相当于为 THz 光束打开一个几十微米尺度的动态孔径。当“十字灯丝”接近待测样品表面时, 即可实现对样品的 THz 近场信号的探测。该系统成像分辨率在 0.94, 1.35, 1.91 THz 处分别达 165, 134, 81 μm 。

导体或电光晶体等材料, 部分近场成像技术的应用范围的扩展受到限制。近年来, 有关 THz 超透镜的研究越发丰富, 超透镜在对大面积样品进行快速扫描的同时能够同时实现高分辨率成像, 因此基于超透镜的 THz 近场成像存在较大的发展空间。2005 年, Belov 等^[60-61]首次利用周期金属线进行仿真得到了 $\lambda/6$ 的近场超分辨率, 并进行了实验验证。随后, 该团队^[62-63]将透镜的长度延长至几个波长, 通过将金属线设计为放射状, 实现了远场超分辨率成像。2007 年, 该团队^[64-65]首次将成像方法应用在 THz 和红外波段, 通过仿真得到了 $\lambda/10$ 的分辨率。2012 年, 亚琛工业大学 Li 等^[66]设计了具有双层石墨烯结构的 THz 超透镜, 如图 10(a) 所示, 仿真得到了 $\lambda/7$ 的近场分辨率, 实现了对双金属狭缝的识别。2014 年, 该团队^[67]进一步理论验证了石墨烯等离子激元(GSP)对隐矢波的放大作用, 并设计了具有单层石墨烯结构的 THz 超透镜, 如图 10(b) 所示, 对金属圆孔进行了超分辨率成像实验, 成像分辨率达到 $\lambda/11$ 。2017 年, 北京大学 Tang 等^[68]利用单层石墨烯结合扇形调制电极设计了双曲透镜, 将目标的传播波和隐矢波均转化为 GSP 并传输至远场, 在 4.5~9 THz 范围内实现了 $\lambda/150$ 的超分辨率, 如图 10(c) 所示。

成像器件, 它可以在实现大面积快速成像的同时, 通过

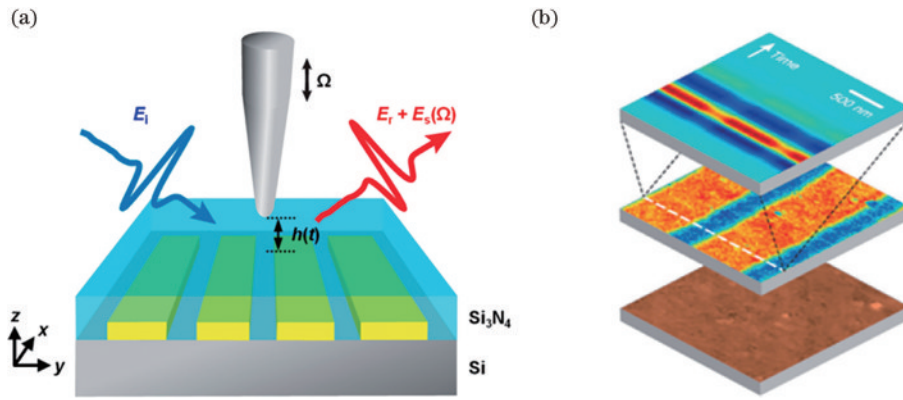


图 9 基于针尖的 THz 近场成像^[43]。(a) 针尖型 THz 近场成像系统；(b) THz 近场峰值强度图像和原子力显微镜 (AFM) 拓扑图
Fig. 9 Tip-based THz near-field imaging^[43]. (a) Needle-type THz near-field imaging system; (b) THz near-field peak intensity image and AFM topography

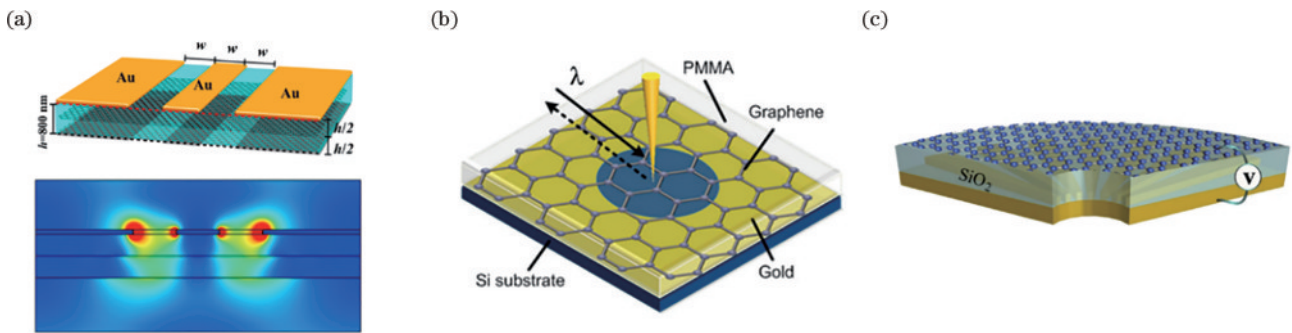


图 10 基于微纳结构调控的 THz 近场成像。(a) 双层石墨烯结构对金属狭缝的识别^[66]；(b) 单层石墨烯结构的 THz 超透镜^[67]；
(c) 基于扇形调制结构的石墨烯双曲超透镜^[68]

Fig. 10 Micro-nano-structure-control-based THz near-field imaging. (a) Recognition of metal slits by double-layer graphene structure^[66];
(b) THz superlens with single-layer graphene structure^[67]; (c) graphene hyperbolic superlens based on sector modulation structure^[68]

增强携带样品信息的隐矢波实现超分辨率成像。因此,超透镜在亚波长聚焦、隐矢波放大从而突破衍射极限的 THz 近场成像上更具优势和应用价值。此外,超材料的微纳结构设计对 THz 波的亚波长聚焦、超衍射传输及耦合增强等方面都有重要意义。

2.4 太赫兹实时成像

随着 THz 逐点扫描成像技术的不断发展,其耗时较长这一缺点限制了此技术的实际应用。并且,这种成像方式是对样品上每个局部区域进行成像测量的,因此无法更好体现样品与 THz 相互作用时的动态特征信息。为了更好地体现样品的图像信息,1996 年,美国伦斯勒理工学院 Wu 等^[69]提出并搭建了基于电光采样方法的脉冲 THz 实时成像系统,光路系统如图 11 所示。在此系统中,探测光扩束后与 THz 波同时照射探测晶体,THz 电场的二维信息直接加载到探测光的横模分布上。为了直接观察 THz 电场的二维信息,在探测光调制前后分别令其通过两个方向正交的偏振片,通过这种方式将探测光的偏振信息转换为强度信息,并由 CCD 相机接收信息。该技术大大缩短了 THz 成像时间,并能够真实呈现携带样品信息的 THz 波的

衍射效果。

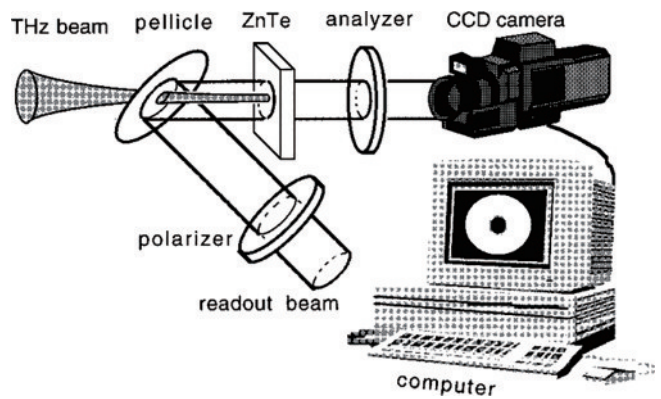


图 11 基于电光采样方法的 THz 脉冲实时成像系统示意图^[69]
Fig. 11 Schematic of THz pulse real-time imaging system based on electro-optic sampling method^[69]

为了进一步提高 THz 实时成像性能,消除探测晶体材料本身缺陷对电光采样实时成像的影响,2007 年,Hattori 等^[70]对探测晶体自身的光学性质缺陷和光波散射所造成的图像畸变进行数据处理,实现了 THz 实时成像质量的优化。同年,Yasuda 等^[71]搭建了透射

式 THz 实时成像系统,采用 CMOS 相机分别对水管中的水滴的移动过程和塑料片中的书钉进行了实时成像观测。此外,美国麻省理工学院的 Werley 等^[72]提出了一种新型的脉冲 THz 实时成像系统,利用飞秒激光的基频光和倍频光照射嵌入待测样品的 LiNbO₃ 晶体,从而观测到了 THz 波在 LiNbO₃ 晶体中的衍射过程,为 THz 实时成像技术提供了新的研究思路。2022 年,南

京大学冯龙呈等^[73]利用光整流和波前倾斜技术产生的强场 THz 波,设计搭建了基于电光探测的实时 THz 近场光谱成像系统,如图 12 所示,该系统可以切换大视场和紧聚焦两种成像模式,为实现系统集成化应用提供了可能性。其中,大视场 THz 成像模式下的最佳成像分辨率可达 $\lambda/4@1.5$ THz;紧聚焦 THz 成像模式下可获得的最佳成像分辨率为 $\lambda/12@0.82$ THz。

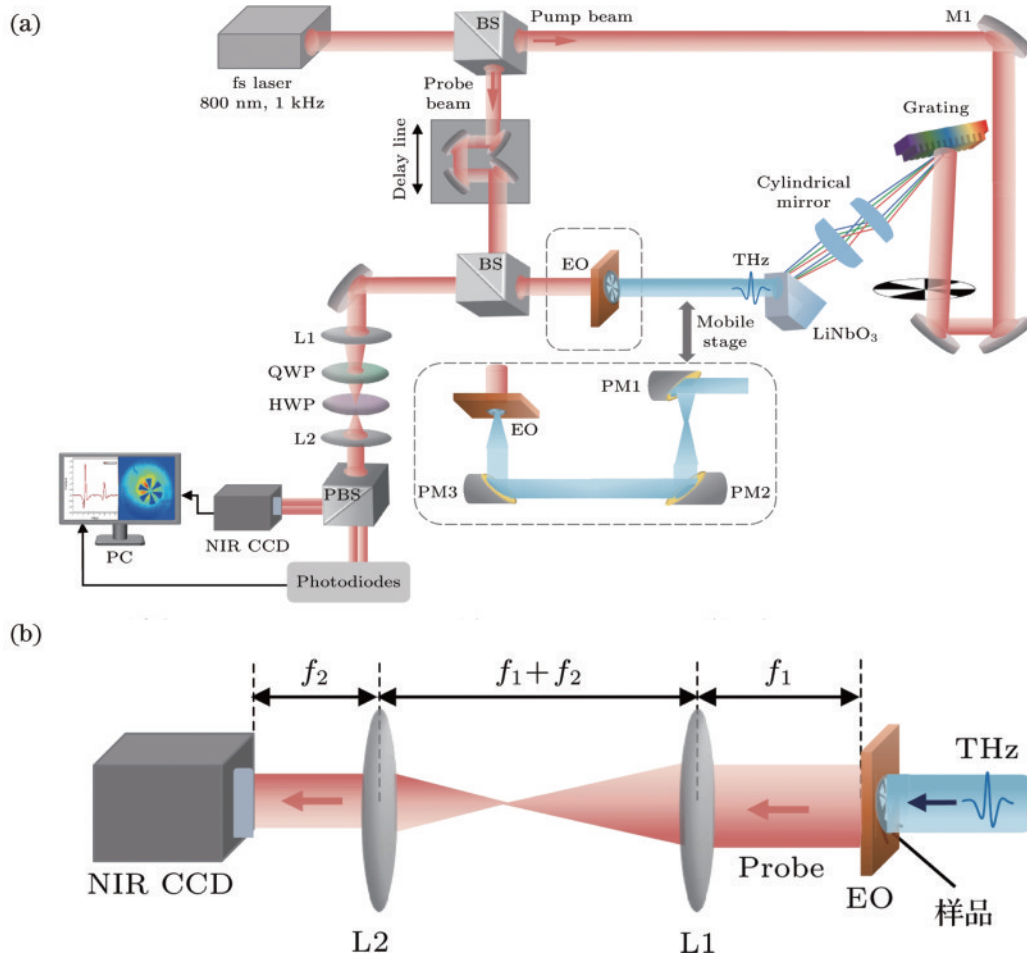


图 12 THz 实时成像^[73]。(a) THz 实时成像系统结构示意图;(b) THz 实时成像原理示意图

Fig. 12 THz real-time imaging^[73]. (a) Schematic of THz real-time imaging system; (b) schematic of THz real-time imaging principle

除此之外,基于连续 THz 辐射源的 THz 实时成像系统也得到了一定发展。2008 年, Yang 等^[74]首次利用 PY-III 型热释电焦平面阵列开展了工作频率为 1.89 THz 的连续 THz 实时成像技术研究。此后,哈尔滨工业大学 Yao 等^[75-77]基于相同型号的热释电焦平面阵列,搭建了连续 THz 实时成像系统,并开展了不同工作频率下(1.63 THz、2.45 THz、2.52 THz)的透射式连续 THz 实时成像技术研究,成像分辨率可达 0.6 mm。此系统具有功耗小、成本低、成像质量好等优点,但探测器响应速度较慢,需要使用斩波器作为辅助。为了进一步提高系统的响应速度和灵敏度,2016 年, Han 等^[78]基于 InGaAs 肖特基二极管(SBD)阵列探测器搭建了 THz 实时成像系统,其平均响应率可达 98.5 V/W,噪声等效功率(NEP)约为 10^{-10} W/Hz^{1/2}。

3 太赫兹成像技术的应用

随着 THz 技术研究的不断深入发展,越来越多的国家认识到其研究的重要性。2004 年, THz 技术首次被美国政府评为“改变未来世界的十大技术”之一;2005 年,日本将 THz 技术列为“国家支柱十大重点战略目标”之首。THz 技术被称为 21 世纪最重要的新兴学科之一。我国虽然在 THz 技术领域的研究起步时间较晚,但对其给予了高度重视。近年来,在各国的大力支持下, THz 技术得到了极大的发展。其中, THz 成像技术因表现出的优异特性,在目标雷达成像、安全检查、无损检测、生物医学等众多领域具有巨大的应用价值。

3.1 安全检查

传统的 X 射线安检设备由于产生的电离能量较高,对人体健康的危害较大;采用磁电特性的金属安检门无法对瓷质危险品和特殊材料制成的炸药进行检测。而 THz 波对大部分干燥、非金属和非极性物质具有很好的穿透能力,能够对隐藏在包裹、信封和衣服中的危险品进行有效探测识别,且具有单光子能量低的优点,不会对人体产生伤害,非常适合于安全检查领域。2003 年, Kawase 等^[79]利用 THz 成像技术成功检测和识别出隐藏在信封中的非法药物,该系统基于 THz 参量振荡器(TPO)对甲基苯丙胺、摇头丸、阿司匹林等药物样品进行多光谱成像,通过获得透射 THz 图像,进而确定药品在信封中的空间分布。2005 年,美国伦斯勒理工学院的 Karpowicz 等^[80]搭建了可应用于安检的小型化连续波 THz 成像系统,利用此系统实

现了对隐藏在公文包中刀具的成像检测。2007 年美国喷气推进实验室(JPL)研制了第一代全固态的高分辨率 THz 主动成像系统,利用将雷达技术与主动式 THz 成像技术相结合的方式获取三维信息。

除此之外,基于被动式 THz 成像技术的安检系统也取得了较大进展。2009 年,英国 Digital Barriers 公司开发了一种新型 THz 安检系统 ThruVision T4000,该系统能够在 3~15 m 的安全距离内对人群进行成像,并可以快速检查出隐藏在复合材料、金属、塑料、液体内的炸弹或其他危险物品^[81],如图 13(a)所示。2014 年,中国电子科技集团公司第三十八研究所基于被动成像原理研发出国内首台 THz 人体安检仪,其能够在 1~2 s 内实现快速安检^[82],如图 13(b)所示。目前,国内外多家研发单位在积极开展 THz 安检设备的研发。

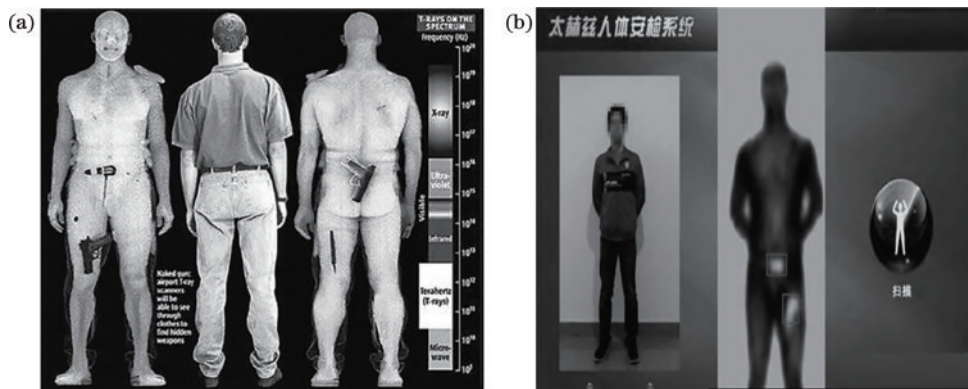


图 13 THz 安检系统。(a) Digital Barriers 公司研制的 THz 安检系统^[81]; (b) 中国电科 38 所研制的 THz 安检系统^[82]

Fig.13 THz security inspection system. (a) THz security inspection system developed by Digital Barriers^[81]; (b) THz security inspection system developed by China Electric Power 38 Institute^[82]

3.2 无损检测

THz 波在非极性材料中具有高透过率的优势,能够穿透较厚的泡沫等材质,并对其内部缺陷进行探测,可以为航空航天设备、飞机、卫星等提供安全保障。2003 年,美国“哥伦比亚号”航天飞机因外置燃料箱泡沫隔离层发生脱粘事故,美国伦斯勒理工学院 Zhang 等对一系列预先设置缺陷的泡沫样品进行了 THz 成像检测,结果表明,THz 成像技术能够识别出绝大多数缺陷,而这类缺陷是 X 射线和超声波等传统的无损探伤技术很难发现的。因此,THz 无损检测技术被 NASA 列为四大常规检测技术之一。2005 年,美国伦斯勒理工学院 Karpowicz 等^[80]分别利用透射式和反射式 THz 成像系统对泡沫中的缺陷进行了检测,如图 14 所示,结果表明,THz 图像中缺陷所在位置与实际标记位置基本一致。2007 年,首都师范大学的周燕等^[83]利用连续 THz 成像系统,成功对铝制泡沫面板中的人工预埋缺陷的形状、位置及大小进行了准确识别。上述结果表明,THz 成像技术在无损检测领域具有广阔的应用前景与研究价值。

3.3 生物医学

THz 波在生物医学研究中具有低能性、水敏感性、指纹谱特性,且覆盖了很多生物大分子的振动和转动频率,在生物医学成像检测领域具有广阔的应用前景。1999 年首次实现了 THz 波对烧伤组织的成像检测研究,自此,国内外多个研究团队分别对 THz 波成像技术在生物医学领域的应用展开研究,图 15 为不同生物组织的 THz 波生物成像检测研究现状。

3.3.1 癌症组织

由于 THz 波对水分子较为敏感,因此早期 THz 波通常用于体表或干燥样品的成像检测。2001 年,德国法兰克福大学的 Löffler 等首先对犬的皮肤癌组织进行了 THz 成像研究^[29],此后,癌症的 THz 成像检测技术得到愈发关注。2003 年,Woodward 等^[84]首次对人体基底细胞癌进行了 THz 成像检测,其检测出的癌症位置与病理学分析结果一致,表明 THz 成像技术可以用于癌症组织的检测。2004 年,Fitzgerald 等^[85]首次实现了对乳腺癌组织的 THz 成像检测,实验结果表明,正常乳腺组织和乳腺癌组织对 THz 波具有明显的吸收

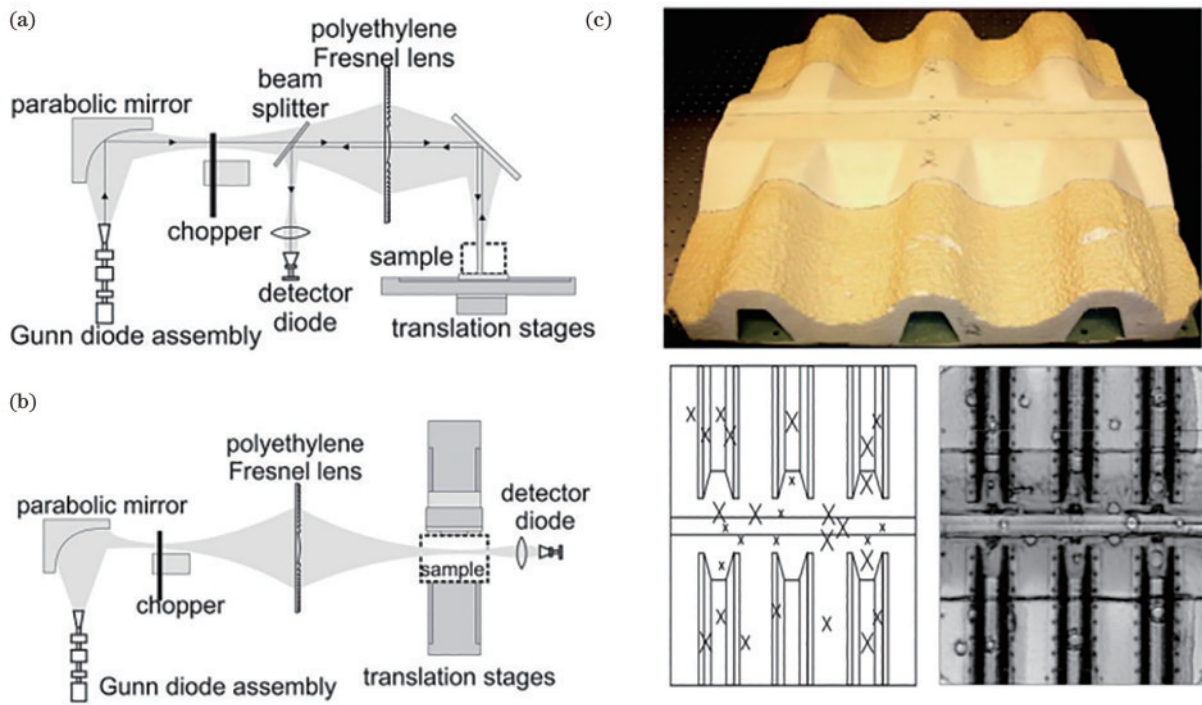


图 14 THz 成像技术在无损检测中的应用^[80]。(a) 反射式连续 THz 成像系统示意图；(b) 透射式连续 THz 成像系统示意图；(c) 泡沫样品的实物图和样品的缺陷示意图

Fig. 14 Application of THz imaging technology in non-destructive testing^[80]. (a) Schematic of reflective continuous THz imaging system; (b) schematic of transmission continuous THz imaging system; (c) photograph of the foam sample and defect map of the sample

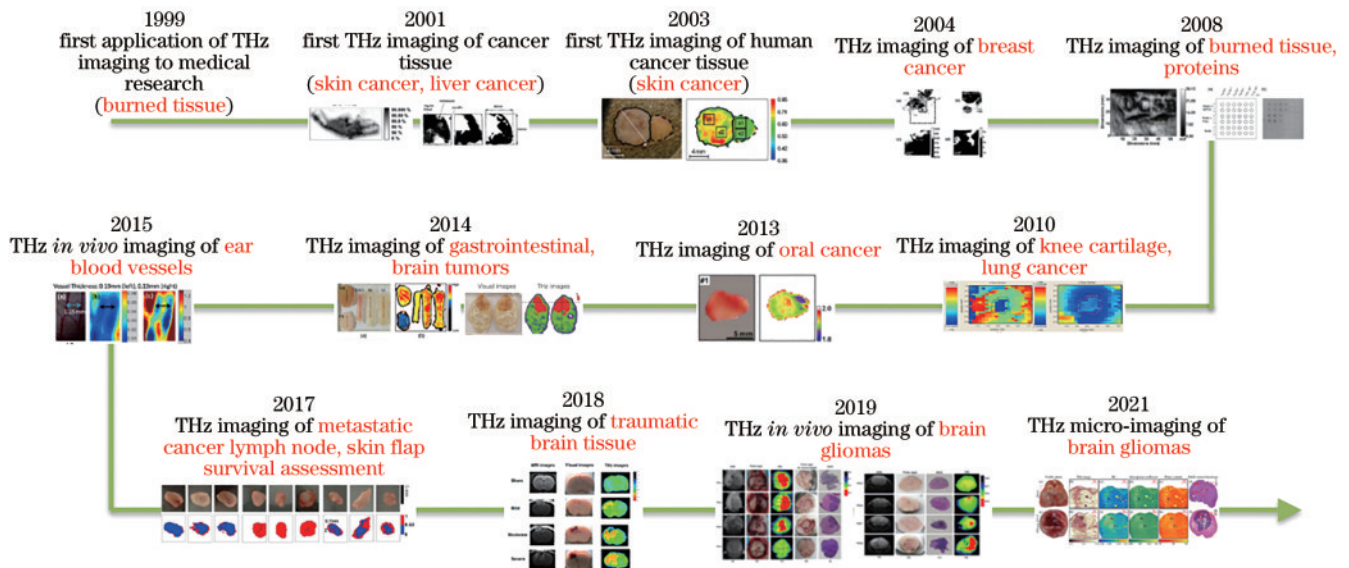


图 15 不同生物组织的 THz 成像检测研究现状

Fig. 15 Current status of research on THz imaging detection for different biological tissues

差异,利用 THz 成像技术可以实现对正常组织和病变组织的区分和检测。2007 年,Enatsu 等^[86]对石蜡包裹的肝癌组织进行了 THz 成像研究,发现正常组织的折射率和吸光系数较为稳定,而肝癌组织的折射率和吸光系数具有明显梯度变化,从而可以实现两者的成像识别。2010 年,Brun 等^[87]对 10 μm 厚的胰腺癌的切片组织进行了反射式 THz 成像研究,基于复折射率对成

像结果进行聚类分析,实现了正常组织和癌症组织的识别。2011 年,Miura 等^[88]开发了一套工作频率范围为 1~6 THz 的宽波段 THz 成像系统,对肝癌组织进行了成像检测,研究了不同频率范围对癌症组织成像检测的影响,结果显示 3.6 THz 处可以获得最佳的图像对比度。同年,美国马萨诸塞大学 Joseph 等^[89]采用输出功率较高的光泵浦气体 THz 激光器对人体皮肤癌

组织进行了成像研究,分别在 1.47 THz 和 1.67 THz 的工作频率下实现了 400 μm 和 500 μm 的成像分辨率,利用不同区域 THz 波透过率的差异实现了对癌症组织的识别。2011 年, Jung 等^[90]采用反射式 THz 成像系统实现了对宫颈癌的检测,健康组织和癌症组织对 THz 波的反射信号幅值差约为 5%。2011 年, Wahaia 等^[91]分别对新鲜的和石蜡包埋的正常结肠组织和癌变组织进行了 THz 成像研究,结果发现, THz 波可以同时新鲜和石蜡包埋的癌症组织进行识别,说明除水分外还有其他因素对 THz 波癌症检测有影响。2016 年,美国马萨诸塞大学 Martin 等^[92]使用工作频率为 0.58 THz 的光泵浦气体 THz 激光器搭建了反射式连续 THz 成像系统,收集了非黑素瘤皮肤癌组织的共偏振和交叉偏振信号,图像分辨率达 150 μm 。2019 年, Duan 等^[93]用透射式 THz 成像系统对肝癌的切片组织进行了成像研究,结果表明,能够通过 THz 波成像识别出星点分布在正常组织中的肝癌组织,该研究推动了 THz 成像在早期肝癌检测中的应用。目前, THz 成像技术已拓展到胃癌、肺癌等不同组织和不同状态下的多种癌症组织的成像检测领域。

3.3.2 脑组织

2009 年, Png 等^[94]对冰冻的人脑组织进行 THz 成像和初步研究,从而开始了 THz 成像技术在脑科学领域的应用研究。同年, Bakopoulos 等^[95]搭建了基于非线性光学的可调谐 THz 辐射源并将其应用于脑组织成像。2011 年,韩国延世大学 Oh 等^[96]首次报道了脑肿瘤的 THz 成像检测的初步研究,2014 年,该课题组^[97]对脑胶质瘤组织切片样本进行了反射式脉冲 THz 成像,图像分辨率为 250 μm ,通过时域峰-峰值计算了样本的 THz 反射率, THz 图像可以清晰反映出肿瘤区域。2016 年, Yamaguchi 等^[98]报道了新鲜脑肿瘤的 THz 成像研究,实现了高对比度的肿瘤成像检测。2018 年,本课题组^[31]使用透射式连续 THz 成像系统实现了对不同程度的击打性脑损伤的识别, THz 图像中的高吸收区域与可见图像和磁共振成像结果中的受损区域非常吻合。进一步,本课题组^[99]提出了一种基于生物 THz 图像的特征提取方法,通过利用机器学习算法实现了对不同程度创伤的自动识别。2019 年,本课题组^[100]利用三维重构技术对脑组织的 THz 图像进行重构,实现了对击打性创伤脑组织的三维建模,重构后的模型可以清楚地反映鼠脑内部创伤区域的空间分布。同年,本课题组^[101]基于工作频率为 2.52 THz 的光泵浦气体 THz 激光器搭建了反射式连续 THz 成像系统,首次实现了脑胶质瘤的在体成像。 THz 图像中显示的肿瘤区域的体积和位置与相应的核磁共振、视觉和病理学图像相似,图像分辨率为 200 μm 。在此基础上,本课题组^[102]还研究了温度对脑胶质瘤组织的 THz 成像效果的影响。2022 年,本课题组^[103]基于连续 THz-ATR 扫描成像系统实现了对不同程度冲击性脑

创伤的成像检测,通过与支持向量机(SVM)分类器相结合,实现了对创伤区域的自动识别。2021 年, Chernomyrdin 等^[104]利用固体浸没透镜技术搭建的反射式连续 THz 成像系统实现了对离体脑胶质瘤组织的反射成像,系统成像分辨率达 0.15 λ ,利用成像过程获得的 THz 强度信息对物体成像平面上的折射率分布进行重建,从而实现了脑胶质瘤坏死组织和出血组织的识别。

4 总结与展望

综述了 THz 成像技术的主要研究进展,介绍了目前常见的 THz 成像技术的典型技术方法,并介绍了 THz 成像技术在安全检查、无损检测及生物医学等领域的应用现状。虽然目前 THz 技术在许多方面具有很大的优势,但仍存在一定的局限性,该技术未来可以从以下几个方面进行技术突破:

- 1) 提高 THz 辐射源的输出功率和功率稳定性,拓宽调谐范围,从而减少 THz 波在成像过程中由于能量损失问题导致的图像信噪比较低对成像结果的影响;
- 2) 对扫描成像方式进行改进,通过引入压缩感知或 CCD 相机等技术和器件,减少成像时间,以满足高速成像需求;
- 3) 对 THz 波与不同物质相互作用的机理进行研究,研究 THz 波在成像过程中的分布与传输特性,通过优化材料和结构设计等进一步提高成像性能;
- 4) 深入研究波导、阵列、超透镜、双曲透镜等微纳结构对 THz 波超衍射传输、耦合增强、亚波长聚焦等作用机制,以及石墨烯等新兴材料在 THz 波隐身场非共振增强方面的应用,以实现结构简单、集成化、紧凑型 THz 成像系统;
- 5) 引入边缘检测算法、超分辨率图像重建等数字图像处理技术和压缩感知成像、图像增强技术、相位恢复成像技术等计算成像技术,以在更短的时间内获得更高质量的 THz 图像,从而满足生物医学诊断、芯片缺陷检测、安全检查等更多领域的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Wallace V P, Fitzgerald A J, Shankar S, et al. Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma *ex vivo* and *in vivo*[J]. British Journal of Dermatology, 2004, 151(2): 424-432.
- [2] Lee A W M, Williams B S, Kumar S, et al. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320 \times 240 microbolometer focal-plane array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(13): 1415-1417.
- [3] Ok G, Park K, Kim H J, et al. High-speed terahertz imaging toward food quality inspection[J]. Applied Optics, 2014, 53(7): 1406-1412.
- [4] 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.

- [5] Schumann S, Jansen C, Schwerdtfeger M, et al. Spectrum to space transformed fast terahertz imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19200-19205.
- [6] Chan W L, Moravec M L, Baraniuk R G, et al. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 974-976.
- [7] 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.
- [8] Chernomyrdin N V, Kucheryavenko A S, Kolontseva G S, et al. Reflection-mode continuous-wave 0.15 λ -resolution terahertz solid immersion microscopy of soft biological tissues[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(11): 111102.
- [9] Wojdyla A, Gallot G. Attenuated internal reflection terahertz imaging[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 112-114.
- [10] Doradla P, Alavi K, Joseph C S, et al. Detection of colon cancer by continuous-wave terahertz polarization imaging technique[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(9): 090504.
- [11] Oh S J, Kang J, Maeng I, et al. Nanoparticle-enabled terahertz imaging for cancer diagnosis[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3469-3475.
- [12] Oh S J, Kim S H, Jeong K, et al. Measurement depth enhancement in terahertz imaging of biological tissues[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21299-21305.
- [13] Fan S Z, Qi F, Notake T, et al. Real-time terahertz wave imaging by nonlinear optical frequency up-conversion in a 4-dimethylamino-*N*'-methyl-4'-stilbazolium tosylate crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(10): 101106.
- [14] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [15] Löffler T, Bauer T, Siebert K J, et al. Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue[J]. *Optics Express*, 2001, 9(12): 616-621.
- [16] Auston D H, Smith P R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 43(7): 631-633.
- [17] Fattinger C, Grischowsky D. Terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(6): 490-492.
- [18] Wynne K, Carey J J. An integrated description of terahertz generation through optical rectification, charge transfer, and current surge[J]. *Optics Communications*, 2005, 256(4/5/6): 400-413.
- [19] Xie X, Dai J M, Zhang X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(7): 075005.
- [20] Johnson J L, Dorney T D, Mittleman D M. Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(6): 835-837.
- [21] Banerjee D, von Spiegel W, Thomson M D, et al. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 9060-9066.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhang L L, Zhong H, Deng C, et al. Terahertz polarization imaging with birefringent materials[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 4993-4995.
- [25] Moriwaki A, Okano M, Watanabe S. Internal triaxial strain imaging of visibly opaque black rubbers with terahertz polarization spectroscopy[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(10): 106101.
- [26] Zang X F, Mao C X, Guo X G, et al. Polarization-controlled terahertz super-focusing[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(7): 071102.
- [27] Zang X F, Ding H Z, Intaravanne Y, et al. A multi-foci metalens with polarization-rotated focal points[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(12): 1900182.
- [28] Karpowicz N, Zhong H A, Xu J Z, et al. Non-destructive sub-THz CW imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5727: 132-142.
- [29] Gompf B, Gerull M, Müller T, et al. THz-microspectroscopy with backward-wave oscillators[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 49(1/2): 128-132.
- [30] Qin H A, Li X A, Sun J D, et al. Detection of incoherent terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(17): 171109.
- [31] Zhao H L, Wang Y Y, Chen L Y, et al. High-sensitivity terahertz imaging of traumatic brain injury in a rat model [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(3): 036015.
- [32] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Terahertz imaging based on morphological reconstruction[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 6800107.
- [33] Yang X A, Shi J A, Wang Y Y, et al. Label-free bacterial colony detection and viability assessment by continuous-wave terahertz transmission imaging[J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(8): 201700386.
- [34] 谢旭, 钟华, 袁韬, 等. 使用太赫兹技术研究航天飞机失事的原因[J]. *物理*, 2003, 9: 583-584.
- Xie X, Zhong H, Yuan T, et al. Terahertz imaging of defects in space shuttle foam insulation[J]. *Physics*, 2003, 9: 583-584.
- [35] Darmo J, Tamosiunas V, Fasching G, et al. Imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 1879-1884.
- [36] Gerasimov V V, Knyazev B A, Cherkassky V S. Obtaining spectrally selective images of objects in attenuated total reflection regime in real time in visible and terahertz ranges[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2010, 108(6): 859-865.
- [37] Liu H X, Wang Y Y, Xu D G, et al. High-sensitivity attenuated total internal reflection continuous-wave terahertz imaging[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(37): 375103.
- [38] Liu H X, Wang Y Y, Xu D G, et al. Optimization for vertically scanning terahertz attenuated total reflection imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20744-20757.
- [39] 武丽敏, 徐德刚, 王与焯, 等. 共光路连续太赫兹反射

- 和衰减全反射成像[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 118701.
- Wu L M, Xu D G, Wang Y Y, et al. Common path continuous terahertz reflection and attenuated total reflection imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(11): 118701.
- [40] Watson D W, Jenkins S D, Ruostekoski J, et al. Toroidal dipole excitations in metamolecules formed by interacting plasmonic nanorods[J]. *Physical Review B*, 2016, 93(12): 125420.
- [41] 王冠文, 祁峰, 李玉峰. 太赫兹近场合成孔径成像与焦平面成像对比[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(6): 962-966, 983.
- Wang G W, Qi F, Li Y F. Comparison of terahertz near-field SAR imaging and focal plane imaging[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(6): 962-966, 983.
- [42] Matheisen C, Sawallich S, Nagel M, et al. High-speed near-field imaging system based on photoconductive terahertz microprobes[C]//2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2013, Mainz, Germany. New York: IEEE Press, 2013.
- [43] Moon K, Park H, Kim J, et al. Subsurface nanoimaging by broadband terahertz pulse near-field microscopy[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 549-552.
- [44] Dean P, Mitrofanov O, Keeley J, et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(9): 091113.
- [45] Klarskov P, Kim H, Colvin V L, et al. Nanoscale laser terahertz emission microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2676-2680.
- [46] Kiwa T, Tonouchi M, Yamashita M, et al. Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21): 2058-2060.
- [47] Yamashita M, Kawase K, Otani C, et al. Imaging of large-scale integrated circuits using laser-terahertz emission microscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 115-120.
- [48] Yang Y P, Yan W, Wang L. A reflected terahertz-emission microscopy[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(1): 169-171.
- [49] 杨玉平, 施宇蕾, 严伟, 等. 一种新型 THz 显微探测技术[J]. 物理学报, 2005, 54(9): 4079-4083.
- Yang Y P, Shi Y L, Yan W, et al. A new microscopy for THz radiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(9): 4079-4083.
- [50] Zhao J Y, Chu W, Guo L J, et al. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3880-3887.
- [51] Ishihara K, Ohashi K, Ikari T, et al. Terahertz-wave near-field imaging with subwavelength resolution using surface-wave-assisted bow-tie aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(20): 201120.
- [52] Chen H, Ma S H, Wu X M, et al. Diagnose human colonic tissues by terahertz near-field imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(3): 036017.
- [53] Xu Y H, Zhang X Q, Tian Z, et al. Mapping the near-field propagation of surface plasmons on terahertz metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(2): 021105.
- [54] Chen S C, Du L H, Meng K, et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2018, 44(1): 21-24.
- [55] Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1/2/3/4/5/6): 22-26.
- [56] 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.
- [57] Chen S C, Feng Z, Li J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-array microscope[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 99.
- [58] Wang X K, Ye J S, Sun W F, et al. Terahertz near-field microscopy based on an air-plasma dynamic aperture[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 129.
- [59] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(15): 3009-3011.
- [60] Belov P A, Simovski C R, Ikonen P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(19): 193105.
- [61] Belov P A, Hao Y, Sudhakaran S. Subwavelength microwave imaging using an array of parallel conducting wires as a lens[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(3): 033108.
- [62] Ikonen P, Simovski C, Tretyakov S, et al. Magnification of subwavelength field distributions at microwave frequencies using a wire medium slab operating in the canalization regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(10): 104102.
- [63] Belov P A, Zhao Y, Tse S, et al. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(19): 193108.
- [64] Silveirinha M G, Belov P A, Simovski C R. Subwavelength imaging at infrared frequencies using an array of metallic nanorods[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(3): 035108.
- [65] Shvets G, Trendafilov S, Pendry J B, et al. Guiding, focusing, and sensing on the subwavelength scale using metallic wire arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(5): 053903.
- [66] Li P N, Taubner T. Broadband subwavelength imaging using a tunable graphene-lens[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 10107-10114.
- [67] Li P N, Wang T, Böckmann H, et al. Graphene-enhanced infrared near-field microscopy[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4400-4405.
- [68] Tang H H, Huang T J, Liu J Y, et al. Tunable terahertz deep subwavelength imaging based on a graphene monolayer[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46283.
- [69] 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.
- [70] Hattori T, Sakamoto M. Deformation corrected real-time

- terahertz imaging[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(26): 261101.
- [71] Yasuda T, Kawada Y, Toyoda H, et al. Terahertz movies of internal transmission images[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15583-15588.
- [72] Werley C A, Wu Q A, Lin K H, et al. Comparison of phase-sensitive imaging techniques for studying terahertz waves in structured LiNbO₃[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): 2350-2359.
- [73] 冯龙呈, 杜琛, 杨圣新, 等. 太赫兹实时近场光谱成像研究[J]. 物理学报, 2022, 71(16): 164201.
Feng L C, Du C, Yang S X, et al. Research on terahertz real-time near-field spectral imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(16): 164201.
- [74] Yang J, Ruan S C, Zhang M, et al. Real-time continuous-wave imaging with a 1.63 THz OPTL and a pyroelectric camera[J]. Optoelectronics Letters, 2008, 4(4): 295-298.
- [75] Yao R, Li Q, Wang Q. 1.63-THz transmission imaging experiment by use of a pyroelectric camera array[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7277: 72770D.
- [76] Yao R, Li Q, Ding S H, et al. Investigation on 2.45-THz array transmission imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7385: 73850P.
- [77] 姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0111001.
Yao R, Ding S H, Li Q, et al. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0111001.
- [78] Han S P, Kim N, Lee W H, et al. Real-time imaging of moving living objects using a compact terahertz scanner [J]. Applied Physics Express, 2016, 9(2): 022501.
- [79] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, et al. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. Optics Express, 2003, 11(20): 2549-2554.
- [80] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, et al. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.
- [81] 蒋林华, 王尉苏, 童慧鑫, 等. 太赫兹成像技术在人体安检领域的研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(01): 46-51.
Jiang L H, Wang W S, Tong H X, et al. Research progress of terahertz imaging in the field of human security[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2019, 41(01): 46-51.
- [82] 周强国, 黄志明. 太赫兹成像技术研究进展及应用[J]. 红外技术, 2022, 44(04): 328-342.
Zhou Q G, Huang Z M. Review of research and application of terahertz imaging technology[J]. Infrared Technology, 2022, 44(04): 328-342.
- [83] 周燕, 牧凯军, 张艳东, 等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测[J]. 无损检测, 2007, 29(5): 266-267, 271.
Zhou Y, Mu K J, Zhang Y D, et al. Nondestructive testing of fuel tank foam with continuous wave terahertz [J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(5): 266-267, 271.
- [84] Woodward R M, Wallace V P, Pye R J, et al. Terahertz pulse imaging of *ex vivo* basal cell carcinoma[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2003, 120(1): 72-78.
- [85] Fitzgerald A J, Wallace V P, Pye R, et al. Terahertz imaging of breast cancer, a feasibility study[C]//Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics, September 27-October 1, 2004, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2005: 823-824.
- [86] Enatsu T, Kitahara H, Takano K, et al. Terahertz spectroscopic imaging of paraffin-embedded liver cancer samples[C]//2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics, September 2-9, 2007, Cardiff, UK. New York: IEEE Press, 2008: 557-558.
- [87] Brun M A, Formanek F, Yasuda A, et al. Terahertz imaging applied to cancer diagnosis[J]. Physics in Medicine and Biology, 2010, 55(16): 4615-4623.
- [88] Miura Y, Kamataki A, Uzuki M, et al. Terahertz-wave spectroscopy for precise histopathological imaging of tumor and non-tumor lesions in paraffin sections[J]. The Tohoku Journal of Experimental Medicine, 2011, 223(4): 291-296.
- [89] Joseph C S, Yaroslavsky A N, Neel V A, et al. Continuous wave terahertz transmission imaging of nonmelanoma skin cancers[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2011, 43(6): 457-462.
- [90] Jung E A, Lim M H, Moon K W, et al. Terahertz pulse imaging of micro-metastatic lymph nodes in early-stage cervical cancer patients[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(2): 155-160.
- [91] Wahaia F, Valusis G, Bernardo L M, et al. Detection of colon cancer by terahertz techniques[J]. Journal of Molecular Structure, 2011, 1006(1/2/3): 77-82.
- [92] Martin J P, Joseph C S, Giles R H. Continuous-wave circular polarization terahertz imaging[J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(7): 070502.
- [93] Duan F, Wang Y Y, Xu D G, et al. Feasibility of terahertz imaging for discrimination of human hepatocellular carcinoma[J]. World Journal of Gastrointestinal Oncology, 2019, 11(2): 153-160.
- [94] Png G M, Flook R, Ng B W H, et al. Terahertz spectroscopy of snap-frozen human brain tissue: an initial study[J]. Electronics Letters, 2009, 45(7): 343-345.
- [95] Bakopoulos P, Karanasiou I, Pleros N, et al. A tunable continuous wave (CW) and short-pulse optical source for THz brain imaging applications[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(10): 104001.
- [96] Oh S J, Huh Y M, Kim S H, et al. Terahertz pulse imaging of fresh brain tumor[C]//2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, October 2-7, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [97] Oh S J, Kim S H, Ji Y B, et al. Study of freshly excised brain tissues using terahertz imaging[J]. Biomedical

- Optics Express, 2014, 5(8): 2837-2842.
- [98] Yamaguchi S, Fukushi Y, Kubota O, et al. Brain tumor imaging of rat fresh tissue using terahertz spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30124.
- [99] Shi J, Wang Y Y, Chen T N, et al. Automatic evaluation of traumatic brain injury based on terahertz imaging with machine learning[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 6371-6381.
- [100] 王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 基于太赫兹波成像的鼠脑创伤三维重构[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0317002.
Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Three-dimensional reconstruction of rat brain trauma based on terahertz imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0317002.
- [101] Wu L M, Xu D G, Wang Y Y, et al. Study of *in vivo* brain glioma in a mouse model using continuous-wave terahertz reflection imaging[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(8): 3953-3962.
- [102] Wu L M, Wang Y Y, Liao B, et al. Temperature dependent terahertz spectroscopy and imaging of orthotopic brain gliomas in mouse models[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 13(1): 93-104.
- [103] 王与焯, 李海滨, 王泽龙, 等. 大鼠冲击性脑创伤的太赫兹波成像检测[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1017001.
Wang Y Y, Li H B, Wang Z L, et al. Terahertz wave imaging detection of blast-induced traumatic brain injury of rats[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1017001.
- [104] Chernomyrdin N V, Skorobogatiy M, Gavdush A A, et al. Quantitative super-resolution solid immersion microscopy via refractive index profile reconstruction[J]. Optica, 2021, 8(11): 1471-1480.