

文章编号: 2095-4980(2025)06-0541-28

太赫兹成像技术综述

李天宇, 方兴, 杨作民, 张鹿, 余显斌*

(浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 太赫兹成像技术作为一种新兴的成像手段, 具有非侵入、无损检测和高分辨力的优势, 近年来取得了显著进展。本文从技术路线和研究现状对太赫兹成像技术进行综述分析。根据信号源类型, 对比分析了脉冲太赫兹成像与连续波太赫兹成像两种机制的技术特性。在此基础上, 重点讨论了具备超分辨成像和高速成像能力的技术方案, 分析了它们的发展现状以及在未来太赫兹成像场景中的优势。最后总结展望了面向应用的太赫兹成像技术挑战。

关键词: 太赫兹成像; 时域光谱技术; 连续波太赫兹; 超分辨成像; 太赫兹阵列; 单像素成像

中图分类号: TN29; O439

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025015

Review of terahertz imaging technologies

LI Tianyu, FANG Xing, YANG Zuomin, ZHANG Lu, YU Xianbin*

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: Terahertz (THz) imaging technology, as an emerging imaging method, has the advantages of being non-invasive, non-destructive, and high-resolution, and has achieved significant progress in recent years. This paper reviews and analyzes terahertz imaging technology from the perspectives of technical approaches and current research status. Based on the type of signal source, the technical characteristics of pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging mechanisms are compared and analyzed. On this basis, the paper focuses on the technical solutions with super-resolution and high-speed imaging capabilities, analyzes their current development status, and discusses their advantages in future terahertz imaging scenarios. Finally, the challenges of application-oriented terahertz imaging technology are summarized and prospected.

Keywords: terahertz imaging; time-domain spectroscopy; continuous wave terahertz; super-resolution imaging; terahertz array; single pixel imaging

成像技术的进步, 不仅改变了人类感知世界的方式, 也为科学研究和社会发展提供了重要支撑。成像技术的发展经历了从简单光学成像到多频谱探测的飞跃, 贯穿了多个科学领域的突破。19 世纪, 摄影术的发明标志着成像技术的起步, 首次将光学成像变为可记录的过程。同一时期, 麦克斯韦电磁理论的提出揭示了光的电磁波本质, 为后续成像技术的发展奠定了理论基础。20 世纪, 成像技术迅速超越可见光谱的局限, X-射线成像的问世, 使人类得以透视身体内部结构, 开创了医学成像的新时代。随后, 红外、紫外、雷达和微波成像技术相继发展, 将成像范围扩展至电磁波谱的更广范围, 并广泛用于医学、工业检测及天文学等领域。进入 21 世纪, 将太赫兹波段的频谱资源用于发展新型成像技术逐渐成为一大研究热点。

太赫兹波是指频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波。自 20 世纪 80 年代以来, 随着超快光电子技术和半导体技术的快速发展, 太赫兹技术受到了越来越多的关注并取得了显著进步。太赫兹波因其独特的物理和化学性质展现出广泛的应用潜力: a) 低能量非电离辐射: 太赫兹波的光子能量低(1 THz 约为 4 meV), 属于非电离辐射类型。

收稿日期: 2025-01-14; 修回日期: 2025-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62471433); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助项目(2023C01139)

*通信作者: 余显斌 email:xyu@zju.edu.cn

引用格式: 李天宇, 方兴, 杨作民, 等. 太赫兹成像技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(6): 541-568. DOI: 10.11805/TKYDA2025015.

Citation format: LI Tianyu, FANG Xing, YANG Zuomin, et al. Review of terahertz imaging technologies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6): 541-568. DOI: 10.11805/TKYDA2025015.

相对于X射线等电离辐射,太赫兹波不会引起原子或分子的电离,破坏生物组织结构,对生物体较为安全,可用于生物医学领域的研究;b)高透过性:太赫兹波对塑料、纸张、陶瓷等光学不透明的非极性材料具有较高的透过率,可用于无损检测;c)分子指纹特性:绝大部分生物分子在太赫兹频段具有独特的吸收峰,因此太赫兹波能够通过特异性的指纹谱识别实现物质的特异性检测和传感;d)水分子吸收敏感性:水分子对太赫兹波吸收十分强烈,可利用这一特性区分含水量不同的生物组织;e)高时间分辨力:太赫兹时域光谱技术可提供高信噪比、宽频谱范围和亚皮秒量级时间分辨力的信号,适用于研究分子动力学及材料瞬态相变过程,尤其在结合相干光泵浦技术时应用更为广泛。基于上述优势,太赫兹波在成像领域展现出巨大潜力,已在无损检测、化学成像、生物检测、农业食品检测等多个方向得到应用和验证。

1 太赫兹成像技术

1.1 太赫兹时域光谱(THz-Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)成像

在太赫兹波段的研究与探索中,THz-TDS技术极为关键。THz-TDS技术通常利用超短脉冲激光器(如飞秒激光器)激发光电导天线(Photoconductive Antenna, PCA)或非线性电光晶体,产生0.1~3 THz之间的太赫兹脉冲信号,并通过延时后的激光激发接收端的光电导天线或非线性电光晶体进行门控^[1-2],这一技术的出现开辟了探索太赫兹波段超宽带频谱信息的新前景,在成像领域得到广泛应用。

Bell实验室的HU等^[3]于1995年提出了最早的THz-TDS成像系统,如图1(a)所示,他们利用该系统对新鲜树叶和脱水树叶进行透射了成像测试。THz-TDS成像系统通过分析太赫兹脉冲与样品相互作用的时域信号,重建样品图像。该系统采用逐点扫描的方式进行成像,采集每个像素点的太赫兹时域信号并通过傅里叶变换获得样品的频域光谱,并还原成相位图像。除了透射式成像,反射式成像也是THz-TDS中一种重要的成像手段。如D Zimdars等^[4]于2004年首次提出的一种反射式扫描成像系统,其平台在x-y平面上固定,通过准直透镜和聚焦透镜分别对发射信号和反射信号进行调控,该系统可在15 min内对250 mm×135 mm的范围进行成像,分辨力达到1 mm。2005年,ZHONG等^[5]也提出一种反射式太赫兹TDS成像系统,如图1(b)所示,可通过移动整个探测模块进行二维扫描。该系统被用于航天飞机燃料箱泡沫隔热材料的缺陷检测,能够精确检测25 mm的材料缺陷;通过控制太赫兹脉冲的时域波形延时,能够实现0.1 mm的深度分辨力。与透射式THz-TDS成像相比,反射式系统适用的样品范围更广泛,样品不需要较薄的厚度和对太赫兹信号的透过性,但其通常只能获取样品表面及其附近的反射信号,无法获得内部结构信息,主要用于进行材料表面形态、缺陷和涂层等的分析。

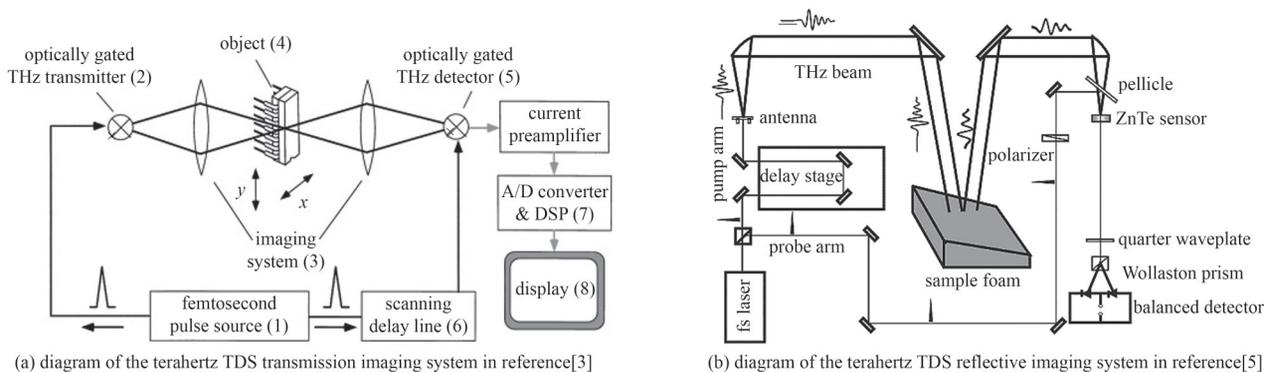


Fig.1 Diagram of typical terahertz TDS imaging system

图1 典型的太赫兹TDS成像系统图

通过机械栅格扫描逐点采集太赫兹图像的效率低,为提升TDS成像速度,研究人员提出光束转向扫描技术,即通过光束转向系统控制太赫兹波束的指向实现步进式的偏转,并经过透镜照射到样品上完成像面的逐点扫描。光束转向扫描成像通常基于反射式成像系统,成像速度更快,并无需样品的平移台,具有更灵活的结构。在光束转向扫描成像中,主要的挑战在于解决光束偏转引起的成像面畸变问题。目前两种主要的转向器件为振镜和多边形旋转镜,针对两种不同的器件,研究人员提出了多种图像重建算法以降低图像失真。2011年,S Katletz等^[6]提出一种二维振镜扫描系统,使用双镜电流扫描仪结合旋转对称透镜偏转光束,并利用二阶多项式拟合法解决不同光路引起波形偏移造成的图像弯曲问题,系统可在2 min内完成65 mm×80 mm区域内胶合塑料板和金属圆片的成像。2015年,D S Yee等^[7]结合电控光学采样实现高速三维成像,分别设计了轴向和非轴向对称的远心f-theta透镜用于光束控制,仅需40 s便可实现100 mm×100 mm范围内40 000个点的扫描。所提出的装置通过采用

光纤耦合的太赫兹发射器和探测器还可升级为集成的便携式扫描头, 但该系统的双振镜中必然有一个振镜处于远心 f - θ 透镜的焦点外, 在光束转向时不可避免地会出现畸变。2020 年, Z B Harris 等^[8]提出一种振镜系统, 在 f - θ 镜头焦点处仅设置一个单镜双轴振镜减小像面畸变, 并提出一种光束转向变换方法。通过使用反射镜偏转角度转换扫描目标坐标, 进一步减小图像畸变, 并最终实现每个像素点 0.5 s 的采集速率和 0.52 mm 的空间分辨率。

此外, 为进一步提升成像速度, 提出了将太赫兹波束焦点扩展为焦线的方式。2008 年, 大阪大学的 T Yasui 等^[9]首次提出一种太赫兹焦线扫描成像系统, 其结构如图 2 所示。太赫兹波束通过一个圆柱透镜汇聚成一条高度为 20 mm 的焦线聚焦到样品上, 从而产生沿样品 x 轴的照明线。在接收端, 太赫兹波束经过一个凸透镜和圆柱透镜后变为平行光入射到 ZnTe 晶体进行光电采样, 并最终由一个太赫兹相机获取图像。他们使用该系统对一个金属孔阵列样品进行成像, 通过横向移动样品使其通过太赫兹焦线, 系统实现了每秒 23 200 像素的成像速度。2011 年, F Blanchard 等^[10]进一步采用准近场探测和差分电光探测的测量方式, 将太赫兹脉冲焦平面成像的图像分辨率提升至 14 μm , 达到了相应太赫兹波长(430 μm)的 1/30, 实现了太赫兹近场显微成像。电光采样中使用了 LiNbO₃ 晶体, LiNbO₃ 具有较强的电光系数, 对太赫兹脉冲信号可产生敏感的反应。如果太赫兹波束具有足够的强度, 还可进一步采用面扫描方式提高成像速度, 一种基于 45° 旋转扫描反射镜的二维扫描被动成像方案被提出。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^[11]。使用该系统, 以垂直排列的四元线列被动太赫兹探测器对 2 m 成像距离下 1 m \times 1 m 成像范围进行二维扫描成像, 不存在明显畸变。

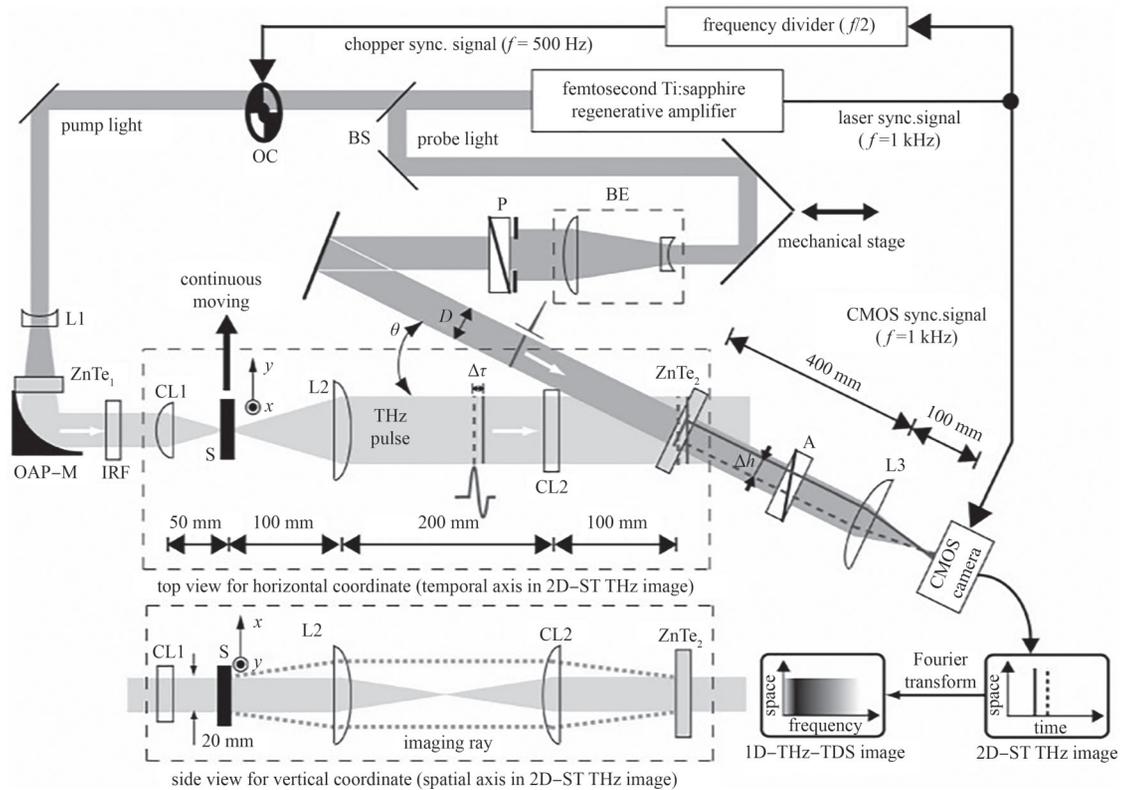


Fig.2 Diagram of terahertz focal line scanning TDS imaging system^[10]

图2 太赫兹焦线扫描TDS成像系统图^[10]

由于 THz-TDS 测量的是瞬态太赫兹电场而非电场强度, 因此能完整获取脉冲波形的时间信息, 包括电场相位、振幅等参数。通过这种方式, 不仅能获取 THz 波的频率信息, 还能分析其时域特性, 如波形的形状、频谱的分布、各频率成分的相位等, 并进一步获得样品的折射率、透射率以及电导率等介质信息, 对材料进行成分检测和物理特性分析^[12-19]。得益于这些先进的技术和其独有的优势, THz-TDS 成像目前在生物医学、新型材料检测等方面得到广泛应用^[20-22], 并涌现出诸多 THz-TDS 商业化方案。为进一步扩展 THz-TDS 成像的应用范围, 需向小型化和集成化发展, 而推动这一进程主要依赖于飞秒激光技术的太赫兹脉冲发射系统的优化改进。

飞秒激光技术在 THz-TDS 成像中起到至关重要的作用。飞秒激光器能够提供高功率、短脉冲的光源, 具有

极高的时间分辨力,这对于产生宽频谱的太赫兹脉冲至关重要。在 THz-TDS 成像中,飞秒激光的脉冲主要通过激发 PCA 或非线性晶体整流产生光电效应,生成太赫兹脉冲信号。其中,PCA 主要基于低温生长的 GaAs 等半导体间隙中电荷载流子的超快光激发^[1-2,23-27];光学整流则利用激光的电场引起非线性材料中的二阶非线性极化效应,产生频率低于激光频率的太赫兹辐射^[28-31]。此外,还有通过高强度飞秒激光器诱导空气中等离子体振荡产生太赫兹辐射的方式^[32-33]。由于飞秒激光的脉冲宽度极短,能够有效激发太赫兹脉冲并精确控制其时间延迟,实现对材料或生物样本的高分辨力成像。飞秒激光提供的短脉冲和高频带宽,使 THz-TDS 覆盖频率范围广泛,从而提高了成像精确度和对物质微结构的检测能力。在太赫兹脉冲的激发方式中,基于光学整流和等离子体激发的方案需搭配高功率飞秒激光器(如钛蓝宝石激光器),且需配置大量光学元件,系统体积庞大。

近年来,一些新型太赫兹脉冲生成方式,如利用光纤飞秒激光器的 PCA 激发系统,因其稳定性、小型化和低功耗特性被广泛用于 THz-TDS。光纤飞秒激光器的工作波长与钛蓝宝石不同,通常为 1 030 nm 或 1 560 nm,传统 PCA 中使用的半导体或非线性晶体相位匹配效率较低,不适用于太赫兹波的激发或整流。因此,迫切需要设计和制造具有短载流子寿命和较高暗电阻率的新型半导体材料。文献[34]中采用 InGaAs/InAlAs 光电导层,可在发射功率、暗电流和接收灵敏度方面实现相较于平面天线数量级的提升。研究人员将这种方式用于 THz-TDS 中太赫兹辐射 1 μm 波长的激发^[35],但这种结构由 100 周期的 InGaAs/InAlAs 组成,制造工艺要求高且成本昂贵。V Pačebutas 等^[36]提出了基于三元 GaAsBi 结构,并将其用于 THz-TDS 系统中太赫兹辐射的发射和探测^[37]。为克服传统 P 型本征 GaAsBi 不适用于 1.55 μm 波长激发的问题,R B Kohlhaas 等^[38]用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)合成本征的 n 型掺铋 InGaAs,在 THz-TDS 系统中用掺铋光纤激光器成功发射 1.55 μm 脉冲。近年来,诞生了如依赖 MBE 生长的钢掺杂 InGaAs,具有超短俘获时间、高电子迁移率和高电阻率。基于这种材料的光纤耦合光导型太赫兹辐射源可达到 637 μW 功率、6.5 THz 带宽和 111 dB 动态范围,为 THz-TDS 成像提供了更强大的技术支持。

面向未来更广阔的应用场景,THz-TDS 成像系统发展的关键问题首先在于需要更高的发射功率,目前微瓦级的发射功率难以适用大范围的太赫兹成像。目前已出现一些新机制解决这一问题,如基于纳米等离子体的开关放大光电产生的太赫兹源,发射功率能够达到 600 mW ^[39];此外,为扩展 THz-TDS 系统的工作带宽,实现多光谱成像,对天线设计进行优化也是十分必要的;最后,还可通过提高太赫兹发射源光电转换效率以减小成像系统功耗,进一步扩展应用范围。通常较长的波长可获得更高效的光电转换,文献[40]中提出的一种基于四元 GaInAsBi 的材料,可利用波长大于 2 μm 的光激励获得太赫兹脉冲,为光电太赫兹系统开辟了新前景。

1.2 连续波太赫兹成像

虽然基于 TDS 的太赫兹成像系统信噪比高,在每个像素点可获取丰富的全频带光谱信息,但 THz-TDS 系统中生成和探测太赫兹脉冲通常需要较为昂贵的硬件和复杂的系统,且成像速度受脉冲重频和数据后处理复杂度的限制,这些都制约了太赫兹脉冲成像(Terahertz Pulse Imaging, TPI)在快速实时成像场景中的应用。太赫兹连续波成像系统虽难以获取丰富的全频带光谱信息,但该系统结构简单,器件性能要求低,便于系统集成和小型化,数据处理机制简单,成像速度更快,因此非常适用于一些对成本及时间敏感的太赫兹成像场景,近年来已成为一个研究热点。

在已有的连续波太赫兹成像方法中,逐点扫描式成像系统由于高信噪比、高空间分辨力和探测原理简单等优点已成为主要的成像方法^[41],并广泛用于生物医学成像领域^[42-46]。此外,为进一步提高成像精确度,研究人员提出共焦式成像,即将光源发出的太赫兹波准直并聚焦到样品上,焦点区域仅覆盖样品的局部,被样品反射或透射的太赫兹波再经过光学系统汇聚到探测器。共焦成像系统通常在光路中引入空间滤波装置,仅允许来自焦点区域的信号进入探测器,其他区域的散射光噪声被显著衰减,从而提升了成像信噪比。2010年,MA Salhi 等^[47]首次提出一种共焦连续波太赫兹显微镜扫描成像系统,太赫兹辐射通过直径为 1 mm 的针孔被聚焦到样品上,在探测器前利用一个直径 0.5 mm 的针孔进行空间滤波,最终在 2.52 THz 处获得了 0.46 mm 的分辨力。不同的空间滤波和连续波太赫兹收发方案也被用于共焦式成像系统,2012年,G Kim 等^[48]提出的共焦连续波太赫兹成像系统使用喇叭天线替代针孔进行聚焦和空间滤波,采用耿氏二极管振荡器生成 0.2 THz 高功率信号,并使用肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)作为探测器进行逐点扫描成像,首次获得 1 THz 频段以下的连续波共焦式成像。U Siciliani de Cumis 等^[49]提出基于量子级联激光器(Quantum Cascade Lasers, QCL)产生 2.9 THz 连续波辐射和 0.3 mm 的针孔进行空间滤波的共焦式成像系统,对新鲜树叶进行成像,得到 200 \times 200 像素数、分辨力为 70 μm 的图像。

目前,在连续波太赫兹成像系统中常用的太赫兹辐射源可按生成方式分为基于电子学和基于光子学的两大

类。基于电子学的连续波太赫兹源主要依赖于半导体倍频器^[50]、回波振荡器^[51-53]、QCL或共振隧穿二极管(Resonant Tunneling Diodes, RTD)。QCL因输出功率高、频率稳定,在连续波太赫兹成像中应用最为广泛。与传统半导体激光器不同,QCL通常基于MBE生长的半导体,电子经过其多层级联的量子阱结构时发生多次跃迁产生光子辐射。自从2002年R Köhler等^[54]率先提出QCL以来,已发展出输出功率较高、频率稳定、成本适中的QCL太赫兹发射源。

与传统红外QCL相比,将太赫兹QCL用于成像领域所面临的关键挑战是使其在室温条件下可运行,并具备良好的可调谐性。热电制冷技术可在维持所需工作温度方面起到关键作用,L Bosco等^[55]在210 K条件下,使用小型四级珀耳帖制冷器实现了3.9 THz QCL的辐射输出。这是首次采用热电制冷技术实现太赫兹QCL的运行,同时也是首个在200 K以上工作的太赫兹QCL,其在206 K时的峰值功率达到1.2 mW,从而能够在无低温冷却系统中进行太赫兹探测。麻省理工学院的A Khalatpour等^[56]研制了工作频率为4 THz,最高工作温度达250 K的太赫兹QCL,能够在环境温度下进行实时太赫兹成像和光谱测量。此外,该器件体积小,为片上太赫兹系统的发展提供了新的可能。2023年,A Khalatpour团队^[57]将该器件的最高工作温度提升至261 K。另一种实现室温太赫兹辐射的方案是采用腔内太赫兹差频机制,即利用双波长中红外QCL泵浦产生太赫兹信号。该方案的优势在于其无需在太赫兹跃迁过程中实现粒子数反转,而中红外QCL可在室温下稳定工作并提供高功率输出^[58]。近年来,这类器件取得了显著进展,其光谱可调范围覆盖2.6~4.2 THz,在太赫兹光谱分析和多光谱成像中展现出极大潜力^[59]。LU等^[60]提出的结合切伦科夫相位匹配技术的分布反馈波导设计的太赫兹QCL,可在3.6 THz处将峰值功率提升至1.4 mW。J H Kim等^[61]采用双金属波导并结合表面光栅耦合器的太赫兹QCL结构,使发射波长的红端可拓展至2 THz以下,并在1.9 THz处实现了超过110 μ W的峰值功率输出,展现出较高的中红外-太赫兹转换效率。

上述研究进展为未来太赫兹QCL的室温运行、紧凑化设计及紧凑型室温太赫兹成像系统的发展奠定了重要基础。2000年代末,陆续出现了基于太赫兹QCL的成像应用,这些光栅扫描成像分别使用了冷却的测辐射热计^[62]、高莱盒^[63]或热释电探测器^[64]进行探测。2012年,M Ravaro等^[65]首次演示了基于太赫兹QCL的共焦显微镜,在2.9 THz实现了67 μ m的横向分辨率和400 μ m的轴向分辨率。为提高动态范围和图像采集速度,可利用太赫兹QCL发射的高内在相干性^[66]。该研究提出的成像系统中,QCL的太赫兹输出被光束分离器分成3束,其中2束分别发送至2个相同的电光采样单元,第3束则聚焦到样品上。其中一个电光采样单元作为超快近红外电光调制器,使2.5 THz QCL的发射信号产生光频梳,并在接收端与载波在光电二极管上混频,产生一系列在零赫兹到激光重频一半之间的外差拍频信号,实现QCL信号从THz下变频到MHz,最后用锁相放大器进行接收。第2个电光单元则用于采样正射入样品表面的反射THz光束。通过结合栅格扫描,该系统成功实现相干太赫兹成像,动态范围达60 dB,且QCL仅需250 μ W入射功率即可工作。为进一步降低系统复杂性,还可利用太赫兹QCL的自混频进行相干接收。当部分太赫兹辐射重新注入QCL腔体时,反射回来的光与腔内光场相干,导致激光的光学和电气特性发生变化,对这种变化进行测量即可实现相干接收。在这种方案中,太赫兹QCL既作为发射器,也作为相干探测器。此外,由于光必须返回到极小的(波长级别)激光面,这种自混合现象是自对准的,并具备共聚焦特性。文献[67-68]通过QCL发射、自混频接收实现了成像。在无损检测方面,基于太赫兹QCL的连续波成像也具有独特优势:与亚THz连续波成像相比,具有高分辨力;与常见的2 THz以上脉冲系统相比,具有高动态范围,以及提供使用大型阵列THz微测辐射热计相机进行实时全场成像的可能。太赫兹QCL具有高频段、高功率特性,将太赫兹QCL技术与太赫兹相机相结合,可极大发展太赫兹多光谱成像,有望突破到工业级应用。文献[69]中使用3个分别发射2.5 THz、3.4 THz和4.3 THz的QCL和一个基于超材料的焦平面阵列作为探测器,获取了不同化学成分颗粒的图像,利用不同THz频率下化学物质吸收的差异区分每个颗粒。文献[70]将一个2.5 THz QCL用于光栅扫描成像中,检查基于碳纤维和凯夫拉尔的两种复合材料中的缺陷。该方法使用交叉极化成像检测凯夫拉尔复合材料中的分层和碳纤维复合材料中的裂纹,该材料如今在航空航天工业和汽车工业中广泛使用。

RTD则是另一种被认为在基于电子学的连续波太赫兹成像中极具应用潜力的器件。RTD由2层或3层超薄且紧密堆叠的大带隙半导体嵌入低带隙半导体中构成,当两端施加电压时,电子在势垒中发生隧穿,并在谐振态下于不同能级之间跳跃辐射光子。在探测模式下,当太赫兹波入射到RTD时会引起能带结构和隧穿电流变化,通过检测电流变化进行太赫兹波的探测。麻省理工学院林肯实验室E R Brown团队^[71]在1989年首次报告了420 GHz的室温太赫兹辐射源;1991年,太赫兹发射频率达到了712 GHz^[72]。之后,加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校的M J W Rodwell等^[73]也对RTD进行了探索,将其作为脉冲形成非线性传输线的增益元件。但此后RTD在更高频段的输出功率遇到瓶颈,直到2010年,2个研究团队几乎同时报告了成功实现1 THz的工作频率这一里程碑^[74-75]。

这一突破不仅得益于半导体异质结构生长技术的改进,使障碍层更薄,同时也得益于对电子在RTD中的传输机制的更深入理解,尤其是库仑相互作用在电子输运中的作用^[76]。此后,RTD迎来高速发展,其最大工作频率快速提升,2017年,RTD的工作频率达到了1.98 THz^[77-78],为目前最高工作频率。这一成果标志着RTD技术在太赫兹源领域的潜力得到了进一步的释放,为其在高频太赫兹通信、成像和传感等实际应用中提供了新的可能性。目前RTD太赫兹收发器在下一代超高速无线通信系统中已被广泛使用,其在成像领域和其他无损检测中的应用也逐渐兴起且发展迅速。文献[79]报道了一种紧凑型300 GHz的RTD相机原型,其尺寸仅与硬币相当,相机中集成了RTD收发器和准直透镜。利用该RTD相机实现了透射式和反射式成像系统,其中反射式成像系统以1 mm的空间分辨力成功对塑料盒内的物体进行成像。这些实验结果证明RTD能够为未来紧凑型太赫兹成像系统的发展提供有力支持。LI Y等^[80]提出了一种简化的345 GHz反射式成像系统,与传统的相干层析成像相比,该系统无需集成参考镜、太赫兹源、分束器和探测器,仅用一个RTD收发器替代,大大降低了系统复杂度。

基于光子学的连续波太赫兹源与基于电子学的相比,具有高精度、抗干扰能力强和可调谐带宽大等优势,被认为是未来最关键的太赫兹成像技术路线之一。该方法使用两种频率接近的激光器,在超快半导体光电探测器(Photodiode, PD)或PCA中进行混频,生成频率为两者频率差的太赫兹光电流信号。生成的光电流驱动天线,产生连续波太赫兹信号辐射到自由空间。因此可十分方便地通过调节激光器的频率间隔,对连续波太赫兹信号频率进行大范围调谐。目前常用的光混频器件包括PCA^[81]、PIN型光电二极管(P-type Intrinsic N-type Photodiode, PIN-PD)、单向行进载流子光电二极管(Uni-Traveling Carrier Photodiode, UTC-PD)^[82]、行波单向行进载流子光电二极管(Traveling-Wave Uni-Traveling Carrier Photodiode, TW-UTC-PD)^[83]和n-i-p-n-i-p超晶格光混频器^[84]等。其中UTC-PD在当前太赫兹成像系统中较为常用,其工作频率高达1.5 THz。H Ito等^[85]在1.04 THz下实现了10.9 μW 的目前最大连续波输出功率,且具有良好的线性度。文献[86]比较了UTC-PD和PIN-PD两种典型的商用光混频器的性能,在250 GHz处,UTC-PD的输出功率约100 μW ,而PIN-PD为30 μW 。在1.55 μm 波长范围内,已有大量的紧凑型、可调、低成本的半导体激光器可供选择,与上述光混频器件结合,极大丰富了连续波太赫兹成像的手段。除利用光混频器,另一种基于光子学的连续波太赫兹辐射生成方法是利用非线性介质使入射电磁波发生非线性频率转换生成太赫兹辐射^[87]。目前基于光子学的连续波太赫兹源用于成像主要面临的问题是光电-太赫兹转换效率较低,限制了大多数连续波太赫兹信号的输出功率,通常仅能达到微瓦级别^[88]。

1998年,S Verghese等^[89]首次提出一种光电太赫兹连续波收发系统,将2个工作频率的差频作为太赫兹频段的钛-蓝宝石连续波激光器拍频,并通过PCA生成和检测太赫兹信号,为太赫兹连续波成像系统提供了可行的基础。S Matsuura等^[90]采用基于低温砷化镓的混频器和自由空间相位匹配技术,实现了1 THz以上的太赫兹连续波信号高功率输出,具有更好的集成性和更低的成本。

如果仅利用幅度信息进行成像,成像精确度通常受限^[91]。相位信息中包含了太赫兹波通过样品的路径差和折射率等介质特性,对相位信息进行提取能有效改善成像质量。既能进行幅度成像也能进行相位成像的连续波太赫兹成像系统被称为连续波太赫兹矢量成像系统,其获取相位图像主要通过相干检测进行接收,得到信号的相位信息。所提取的接收信号相位信息可表示为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nd}{\lambda} \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi$ 、 n 、 d 和 λ 分别为接收信号相对于发射信号的相位变化、介质的折射率、样品厚度和太赫兹辐射的波长。

2002年,SIEBERT K J等^[92]首次提出一种连续波太赫兹矢量成像系统。他们采用PCA对2个连续波激光器的输出进行混频,生成1 THz太赫兹连续波,并基于相干接收实现了对样品的幅度和相位成像。由于探测器接收到的信号和本振信号来自同一激光源,相位测量的精确度很高,因此相干探测中的零差探测技术成为太赫兹连续波矢量成像的重要支撑技术。文献[93]中,J Y Kim等基于电光相位调制实现了大动态范围的太赫兹连续波零差检测系统,并在0.2~2 THz频谱范围内获得光谱和成像结果。该方案通过推挽式相位调制方案抑制电光器件的非线性效应,获得了高频率调谐范围;并通过光延迟控制降低了激光噪声,获得了更高的相位成像精确度。随后,K Moon等^[94]基于零差探测方案,使用1.3 μm 双模激光器实现了连续波太赫兹光谱仪。该光谱仪具有成本低、集成性高的优势,并且由于双模激光器的快速调谐能力,可在1 s内实现宽带测量。2017年,SONG等^[95]提出一种无需本振参考的自混频探测太赫兹连续波成像系统,如图3所示。该接收方案利用SBD的平方律接收特性,使探测信号相位与发端激光器无关,可有效消除 2π 相位模糊带来的影响。上述系统在进行锁相检测时所需的本振参考是相位噪声的主要来源,因此S Dülme等^[96]对上述系统的锁相探测方案进行改进,通过引入一路来自发端的参考信号极大地降低了系统的相位噪声,获得了更高的成像信噪比。2021年,YANG等^[97]利用光频梳中不同光

谱线的高相位相关性, 提出一种基于双光梳和自混频的太赫兹矢量成像。该系统中, 级联的相位调制器和强度调制器生成宽带光频梳, 并为所有光梳生成一阶谐波, 太赫兹信号由 UTC-PD 产生, 在 SBD 中被检测。由于光梳之间的高相干性, 相位噪声和频率波动大大减小, 获得了更加稳定的成像性能。

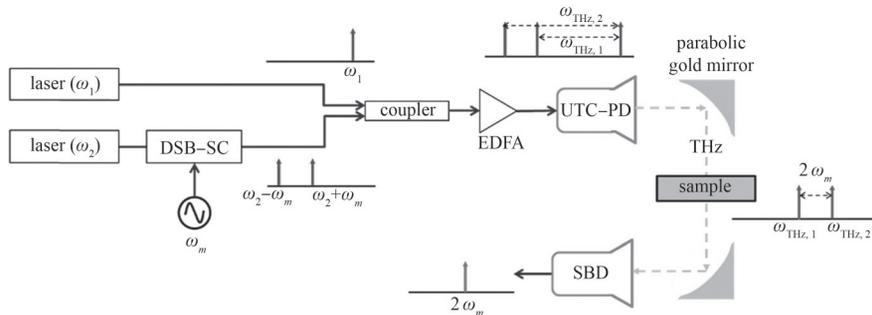


Fig.3 Low phase noise continuous wave terahertz vector imaging system^[95]
图3 低相噪连续波太赫兹矢量成像系统^[95]

目前, 限制连续波太赫兹成像迈向更广泛实际应用的主要因素有: 太赫兹频段大带宽光电器件的成本较高; 缺少高功率、高效率的光电转换设备; 以及连续波太赫兹系统的光谱带宽仍有提升空间。但随着太赫兹波段光电技术的迅速发展和制造水平的不断提升, 这些问题有望在未来一段时间内取得突破。

基于以上论述, 对脉冲式太赫兹成像和连续波太赫兹成像各自的特性、优势进行总结和对比, 如表 1 所示。脉冲式太赫兹成像接收信息量大, 能进行幅度和相位成像, 具有很高的空间分辨力、时间分辨力和频谱分辨力, 且工作频带宽, 获取样品的光谱信息丰富。但实现方式较为复杂, 系统成本高, 数据处理速度慢, 主要适用于材料光谱分析、生物医学成像和文物艺术品检测等。基于克拉默斯-克勒尼希变换(Kramers-Kronig Transform, K-K)和相干接收等方式, 连续波太赫兹成像同样可获取幅度与相位信息, 且实现方式简单, 系统成本低, 数据处理速度快。基于调频连续波^[98]和调谐激光源^[99-100]方式, 连续波太赫兹成像可在 0.2~3 THz 范围内实现宽光谱检测, 最高可达 50 MHz 的频率分辨力, 但由于激光器调谐速率的限制, 连续波光谱系统扫描速度较慢, 通常一次完整光谱扫描需要几分钟, 更适用于对成本敏感和高分辨力成像场景, 如工业检测、安全检测等。

表 1 脉冲式太赫兹成像和连续波太赫兹成像对比

Table1 Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous wave terahertz imaging

| | pulsed terahertz imaging | continuous wave terahertz imaging |
|-------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| bandwidth | broadband (0.1~10 THz) | 0.2~3 THz |
| frequency resolution | low (>1 GHz) | high (<50 MHz) |
| spectral information | yes | yes |
| amplitude/phase imaging | yes | yes |
| spatial resolution | high spatial, temporal and spectral resolution | high spatial resolution |
| system complexity | high | low |
| cost | high | low |

2 太赫兹超分辨成像

传统成像系统的空间分辨力受衍射极限的限制, 如式(2)所示, 衍射极限将太赫兹成像的分辨力限制在毫米级, 无法满足如今许多领域对成像空间分辨力的更高要求。

$$\Delta r = 1.22 \frac{\lambda L}{D} \tag{2}$$

式中 Δr 、 L 和 D 分别为最小可分辨距离、观测距离和孔径。

太赫兹波与样品表面局部区域作用产生的倏逝波携带了目标表面附近的高频空间信息, 可用于重构突破衍射极限的高分辨力图像。但倏逝波的能量主要集中在界面附近, 其振幅在离开界面的方向上呈指数衰减, 难以在远场直接探测。因此, 探测倏逝波并获取太赫兹亚波长尺度信息, 成为太赫兹近场成像技术的关键。目前主要有基于孔径探针和基于散射探针两种方案。

基于孔径探针的太赫兹近场成像技术, 利用尺寸远小于太赫兹波长的孔径产生或探测太赫兹倏逝波, 从而实现高分辨力成像。这种方法也称为扫描近场光学显微镜, 其空间分辨力主要取决于孔径尺寸。具体而言, 基于孔径的太赫兹近场成像技术, 可根据亚波长孔径的结构分为物理孔径太赫兹成像和动态孔径太赫兹成像。

1998年, S Hunsche等^[101]首次成功验证的太赫兹近场成像系统, 采用具有亚波长开口的锥形金属尖端作为物理孔径, 通过将太赫兹辐射聚焦至该孔径生成倏逝波, 并在近场对样本表面进行扫描成像, 最终实现了 $\lambda/4$ 亚波长空间分辨力, 成像系统和成像结果分别如图4(a)和图4(b)所示。

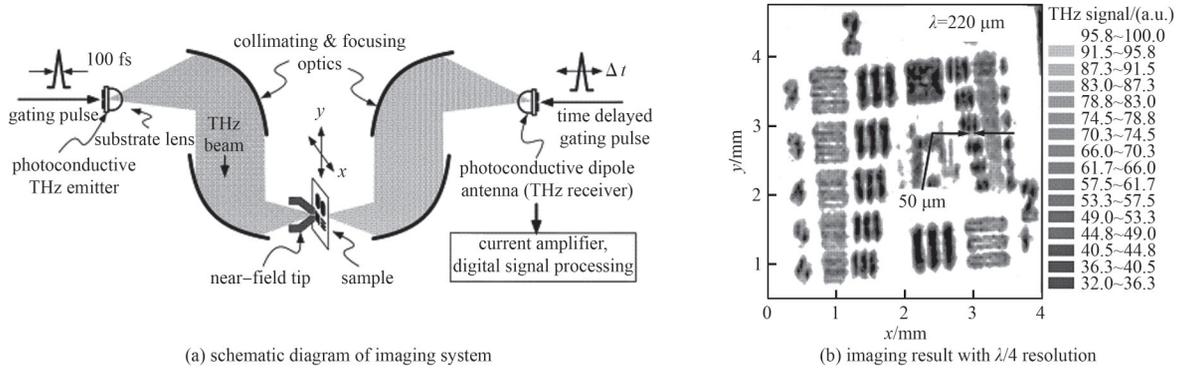


Fig.4 Demonstration of aperture-based terahertz near-field imaging^[101]

图4 基于孔径探针的太赫兹近场成像^[101]

在太赫兹近场成像中, Bethe理论揭示了通过亚波长孔径的透射光强度与孔径大小及波长的关系, 对于亚波长尺寸的孔径, 透射光强度 I 的近似表达式为:

$$I \propto \left(\frac{a}{\lambda}\right)^4 \quad (3)$$

式中 a 、 λ 分别为孔径的直径和入射波的波长。这表明, 当孔径远小于波长时, 透射光的强度非常弱, 且随着孔径的缩小迅速下降, 这严重限制了在太赫兹波段的近场成像中小于 $\lambda/100$ 的孔径使用。为突破这一限制, 实现更高的分辨力, 研究更加先进的近场太赫兹探测器十分必要。2000年, O Mitrofanov等^[102]研究了一种基于低温生长的砷化镓光导天线收集式近场探测器, 相比于照明式方法具有更高的灵敏度和分辨力, 在300~600 μm 的宽光谱范围内达到40 μm 的空间分辨力, 相当于动态范围内最长波长的1/15。2008年, Y Kawano等^[103]提出一种集成化的太赫兹近场成像检测装置, 探针和太赫兹探测器都集成在一个经过低温冷却的半导体芯片上, 从而无需太赫兹波导和透镜等光学元件, 极大提升了对倏逝波检测的灵敏度。A Macfaden等^[104]于2014年提出一种集成光电导探针并发现孔径小于1 μm 时, 透射倏逝场的功率与距离的依赖关系显著偏离了Bethe理论预测。据此效应研发了包含3 μm 孔径的太赫兹近场探针, 实现了3 μm 空间分辨力, 对应于1 THz频率下 $\lambda/100$ 波长的近场成像。

物理孔径探针的孔径大小在制造完成后即固定, 无法调整。与之相比, 动态孔径探针为实时可调直径的微孔结构, 在成像时更加灵活。2000年, CHEN Q等^[105]通过在半导体上引入光学门控波束诱导光载流子层作为孔径, 通过光束焦点调控孔径大小, 实现了空间分辨力优于50 μm 的动态孔径太赫兹近场成像。首都师范大学的WANG X K等^[106]于2022年研究了一种基于空气等离子体动态孔径的技术, 该技术利用2个相互垂直的空气等离子体重叠在样品表面上方对入射太赫兹光束进行调制, 从而无需使用太赫兹探测器或太赫兹接近样品就能实现分辨力为 $\lambda/2$ 的成像, 显著降低了近场光学显微镜对样品选择的限制。

另一种主要的太赫兹近场成像方法则是基于散射探针, 也称为太赫兹散射近场光学显微镜。在传统太赫兹散射探针近场成像中, 利用一个金属尖端将太赫兹辐射聚焦在一个很小的区域内, 当探针靠近样品时, 局域内太赫兹波与样品相互作用并散射到远场, 同时在远场对散射波进行提取。和孔径探针相比, 散射探针不再受截止频率的限制, 适用于宽光谱太赫兹成像。VAN D V N C J等^[107]首次提出了基于散射探针的太赫兹近场成像, 利用金属铜尖端集中太赫兹电场, 并沿晶体表面对探针用磷化镓光电探测晶体进行光栅式扫描, 实现了 $\lambda/110$ 的成像分辨力。CHEN等^[108]采用类似的系统, 利用金属钨尖端聚焦太赫兹脉冲, 实现了150 nm(对应 $\lambda/1000$)的空间分辨力。

散射探针技术的另一大优势就是易于与其他已有的尖端成像技术相结合, 如基于扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)的散射近场成像, 已发展为实现最高太赫兹成像空间分辨力的方案。T L Cocker等^[109]于2013年将飞秒激光驱动的光导天线太赫兹源与高精度STM结合, 实现了对砷化铟纳米颗粒2 nm分辨力的成像, 如图5所示。2021年, S Yoshida等^[110]将基于铈酸锂晶体生成的太赫兹脉冲与STM结合, 探测光泵浦状态下的 C_{60} 结构金纳米簇, 实现了对单个电子运动过程的表征。此外, 还可将太赫兹源和探测与原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)的振动悬臂相结合, 实现基于AFM的散射探针太赫兹近场成像^[111]。相比基于STM的方案, 它可测量绝缘样品, 具有更广泛的应用范围。在凝聚态物理领域, 该技术已被应用到多种材料的

物理性质研究中^[112]。

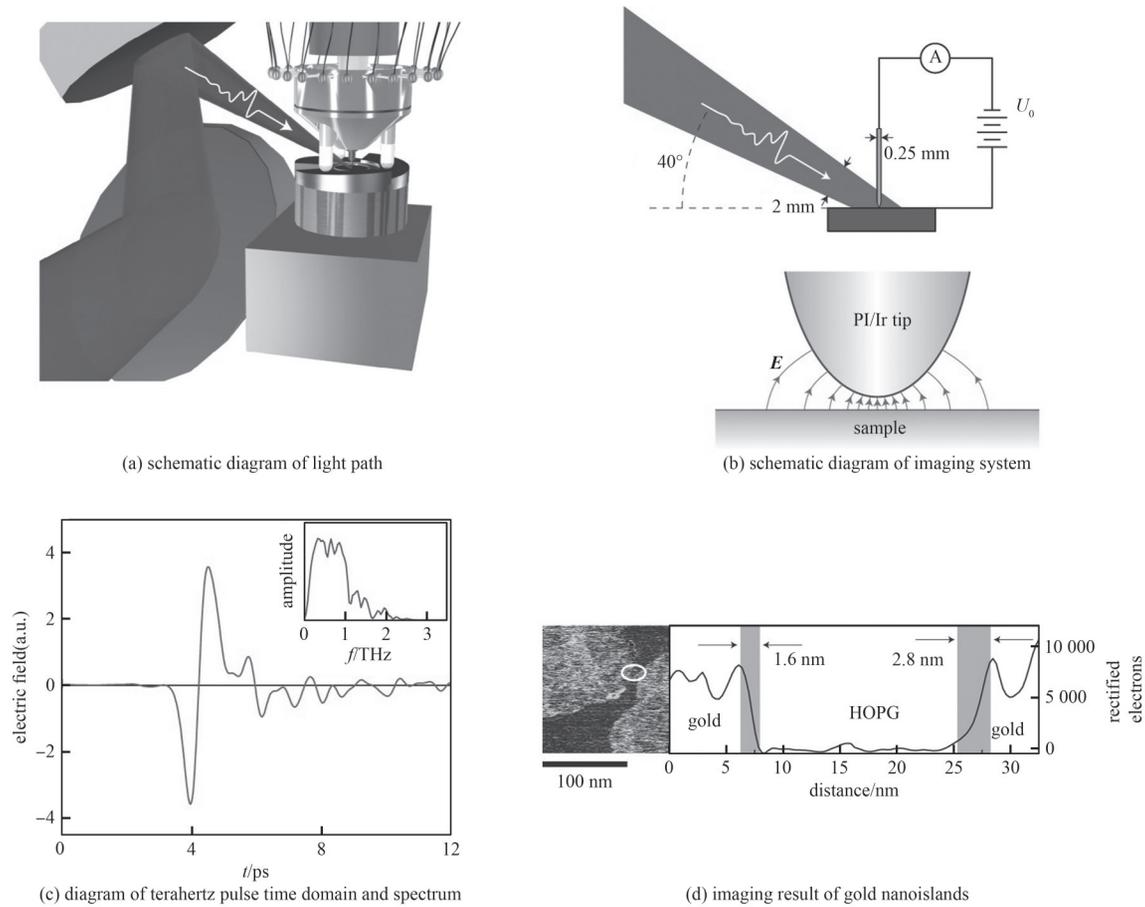


Fig.5 STM-assisted terahertz near-field imaging based on scattering probe^[109]
图 5 STM 辅助的散射探针太赫兹近场成像^[109]

在远场对倏逝波进行探测十分困难, 但技术上并非不可实现。2000 年, J B Pendry 等^[113]发现电磁波在负折射率材料中传输时, 倏逝波振幅呈指数级增长, 并基于此提出了超透镜, 用于在远场放大倏逝波。目前, 实现负折射率主要基于超材料和石墨烯等材料。A Grbic 等^[114]首先利用基于超材料的-1 折射率左手透镜在 1.057 GHz 实现 $\lambda/5$ 分辨力的成像。此外还可利用亚波长周期性金属结构实现超透镜, P A Belov 等^[115]首次采用周期性金属结构设计超透镜, 并在红外频段仿真得到 $\lambda/10$ 的分辨力。随后, J Jung 等^[116]设计金属光栅超透镜, 在 3 THz 中心频率下实现 $\lambda/7$ 分辨力。之后, T J Huang 等^[117]对上述光栅结构进行改进, 通过扇形设计光栅扩展成像距离, 在 0.3 THz 频段达到 $\lambda/10$ 成像分辨力。A Tuniz 等^[118]设计了一种周期性金属结构, 该结构在太赫兹波段具有较低的吸收率, 在中心频率 0.11 THz 下对微线阵列进行近场扫描, 获得了 $\lambda/28$ 的成像分辨力, 这是首次验证周期性金属丝在 THz 波段的超分辨成像能力。但亚波长周期性金属结构超透镜体积大, 损耗高, 在实际应用中存在诸多不便。A Andryieuski 等^[119]设计的扇形结构超透镜通过石墨烯与介质的角度堆叠, 在 THz 波段实现了 $\lambda/5$ 的远场超分辨力。随后, H H Tang 等^[120-121]在 THz 波段进一步实现了 $\lambda/5$ 的远场超分辨力, 他们设计了一种结合扇形调制的单层石墨烯超透镜, 在 4.5~9 THz 带宽下调制太赫兹波, 实现了 $\lambda/150$ 的超分辨成像。目前石墨烯的加工与测试仍面临较大挑战, 尤其是石墨烯的周期性调制技术尚未成熟。近年来, 超表面技术的快速发展促进了新型太赫兹超透镜的研究, JIANG 等^[122]提出了一种基于全电介质超表面的超透镜, 其亚波长单元尺寸为 0.39λ , 并在正向和反向入射情况下均获得清晰的太赫兹波图像, 体现了超透镜成像的可逆性。超透镜技术可有效实现超分辨力图像重建, 但目前的超透镜成像方法仍面临很多挑战: 首先是超材料的制造, 现有的制造工艺受限于加工精确度和成本, 限制了大规模生产和实际应用; 其次, 太赫兹波在介质中传输时会发生较大的损耗, 尤其是在金属材料中, 影响超透镜的效率。尽管有一些设计采用了特殊的结构减小损耗, 但目前仍难于实验室研究之外的应用。

3 高速太赫兹成像

近二十多年来,太赫兹成像技术已得到了长足发展,但实际应用到安全检查、工业无损检测等场景仍面临成像速度和精确度不足的问题,主要是这些场景要求高分辨力、高帧率实时成像。在传统的太赫兹成像系统中,通常采用无空间分辨力的太赫兹探测器,只能通过机械方法移动样品或探测器进行逐点扫描式成像,这部分操作所消耗的时间在总成像时间中占比大。如,使用一个先进的商用 THz-TDS 系统记录一个 640×480 像素的图像需要接近 1 h,这极大限制了太赫兹成像技术的应用。因此,面向未来实时成像或高速动态场景,以及空间有限或对机械稳定性要求高的场景,研究新型太赫兹快速、高分辨力成像技术十分必要。

近年来已涌现出大量加速太赫兹成像和提高太赫兹成像分辨力的研究,其中太赫兹阵列成像和太赫兹单像素成像是具有潜力的两个技术方案。

3.1 太赫兹阵列成像

太赫兹阵列成像依赖于可靠且灵敏的太赫兹探测器阵列的发展。历经数十年的发展,目前已出现较为成熟的太赫兹热学相机和太赫兹场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)相机。对于太赫兹阵列,最重要的指标包括响应度、噪声等效功率(Noise-Equivalent Power, NEP)和像素数,其中响应度能反映阵列对单位太赫兹信号功率的直接响应;NEP 定义为具有单位带宽并能使信噪比达到 1 的信号功率,是最小可探测功率的度量,NEP 越小,则阵列越灵敏。

3.1.1 太赫兹热学相机

太赫兹热学相机通过记录入射太赫兹辐射的热量进行成像。太赫兹微测辐射热计相机由于其相对较高的灵敏度和成熟的制造工艺,在实时太赫兹成像领域有不少应用。它的成像原理是吸收目标物体的太赫兹辐射并将辐射能量转化为热能,随后通过热敏元件将热能转化为电信号,最终经过后处理生成与目标辐射分布对应的图像。微测辐射热计探测器的热敏元件通常基于氧化钒或非晶硅材料,基于此工艺的微测辐射热计探测器易于集成为倒装芯片安装的读出集成电路,十分有利于实现大规模阵列^[123]。由于其工作原理对波长并不敏感,最早研究人员将商用的红外微测辐射热计用于实时太赫兹成像^[124-127],但近年来太赫兹频段专用微测辐射热计设计越来越多。在文献[128]中,N Oda 等提出了一种基于太赫兹微测辐射热计的 320×240 像素的焦平面阵列,他们将探测器单元与读出集成电路(Read-Out Integrated Circuit, ROIC)基板之间形成的光学腔体结构延长,获取了更高的太赫兹频段响应度。2015 年,N Nemoto 等^[129]研制了一种带有谐振腔结构的新型太赫兹微测辐射热计相机,有效提高了太赫兹相机的灵敏度,在 1 THz 时最小可探测功率为 100 pW,实现了一个数量级的提高。但传统太赫兹相机视场范围有限,若实际用于较大视野成像则需要光机扫描辅助,这会导致每个像素积分时间不足,从而影响成像灵敏度。为此,J Luomahaara 等^[130]提出一种免扫描操作的太赫兹微测辐射热计相机,每个探测器单元负责单个像素成像,实现了室温下对 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 视场范围、2.5 m 距离的上千像素成像,成像帧率达 9 Hz。

太赫兹微测辐射热计相机探测灵敏度虽已达到相当水平,如文献[131]所展示的基于微机电系统技术制造的太赫兹微测辐射热计相机灵敏度和 NEP 分别可达 10^6 V/W 和 $5 \text{ pW/Hz}^{1/2}$,但高昂的制造成本是限制其发展的一大瓶颈。为解决这一问题,F Blanchard 等^[132]在商用红外波段微测辐射热计相机基础上,对其数模转换器和动态背景减法检测方法进行改进,其成本仅为同灵敏度商用太赫兹相机的 1/100,在太赫兹波段也具有相当优秀的探测能力。除太赫兹微测辐射热计相机,广泛采用的太赫兹热学相机还包括太赫兹热释电相机^[133-137],其中技术较为先进的已可以实现 1 kV/W 的灵敏度和 $1 \text{ nW/Hz}^{1/2}$ 的 NEP^[109]。其成像原理是通过检测由太赫兹辐射引起的热释电晶体偏振态的变化从而进行电信号传感。与太赫兹微测辐射热计相机相比,虽然它的灵敏度和抗干扰性较差,但成本更低,结构更紧凑。因此,太赫兹热释电相机适用于灵敏度要求不高、环境稳定或成本敏感的成像场景,如安检和基础的太赫兹成像任务。

3.1.2 太赫兹 FET 相机

基于 FET 的太赫兹相机是太赫兹相机的另一条重要技术路线。太赫兹 FET 探测器利用等离子体共振原理,在晶体管沟道中激发等离子波,并在晶体管中产生光电压,从而实现对太赫兹信号的探测,能够在频率远高于晶体管截止频率的情况下检测太赫兹电场。与基于热学的太赫兹相机相比,太赫兹 FET 相机虽不具备灵敏度优势,但响应速度更快,并且结构更加紧凑,占用空间远小于太赫兹热学相机。此外,得益于集成电路技术的发展,太赫兹 FET 相机能够以更低成本大规模制造,并易于与新型 FET 技术如互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺兼容,具有广泛的适用性和出色的可扩展性。

M Dyakonov 和 W Knap 等最早揭示了 FET 探测器的物理机制,并对基于 III-V 族 FET 和硅基 FET 的太赫兹探

测分别进行了实验论证^[138-140]。随着半导体技术的发展, 太赫兹 FET 相机近年来多采用 CMOS 工艺, 文献[141]中, R Al Hadi 等研制了基于 65 nm CMOS 工艺的 1 k 像素太赫兹相机, 可在 856 GHz 下达到最大响应度(1.4×10^6 V/W)和最小 NEP($100 \text{ pW/Hz}^{1/2}$), 且 3 dB 带宽为 790~960 GHz。在基于 CMOS 的太赫兹相机中, 在探测灵敏度不具备优势的情况下, 如何进一步激发其快速响应和可集成性的潜力成为关键问题。文献[142]中, S Yokoyama 等提出一种并行处理架构的太赫兹 CMOS 相机, 如图 6(a)所示, 在减小功耗的同时极大提升了探测信号处理速度, 减少了成像时间。文献[143]提出了一种基于低成本 CMOS 工艺实现的 32×32 像素太赫兹相机, 并采用更先进的集成工艺, 为多芯片封装实现太赫兹相机开辟了新的前景, 其架构如图 6(b)所示。与太赫兹热学相机的宽频谱特性不同, 上述工作所展示的太赫兹 CMOS 相机通常只能工作在较低的太赫兹频段且带宽有限。这主要是因为大带宽的太赫兹 CMOS 探测器通常探测效率低下, 无法提供足够灵敏度; 其次, 大带宽要求更大的像素间距和更为复杂的读出电路, 不利于实现高分辨力成像。文献[144]提出了一种具有 16.4 k 像素的太赫兹 CMOS 相机, 采用阶梯覆盖贴片天线的紧凑型双晶体管像素单元, 并利用列并行读出架构平衡信号处理速度和信噪比, 同时保持较低复杂度。最终在 3.08~3.86 THz 频段实现 7.53×10^3 V/W 探测灵敏度, 并能以 130 fps 帧率进行成像。

总之, 太赫兹阵列成像在未来太赫兹高帧率、高分辨力实时成像的发展中具有极大的潜力, 但目前仍有一些限制其迈向大规模应用的问题亟需解决。首先, 现有太赫兹相机尤其是太赫兹热学相机在复杂环境条件, 如高温、高湿度或背景噪音下探测能力有待提升, 否则难以适应某些工业检测场景的需求; 其次, 太赫兹相机的高额成本和复杂制造工艺也是限制其广泛应用的一个重要原因。这两大问题的解决可能需要探索更加先进的太赫兹探测技术和太赫兹探测器阵列集成制造工艺, 如研究人员考虑应用超材料辅助以增加对太赫兹信号的吸收能力^[145-148], 或如文献[132]所展示的利用热辐射效应的宽频谱特性, 在已有的价格相对低廉的其他波段商用成像相机基础上加以改进, 获取太赫兹成像相机。

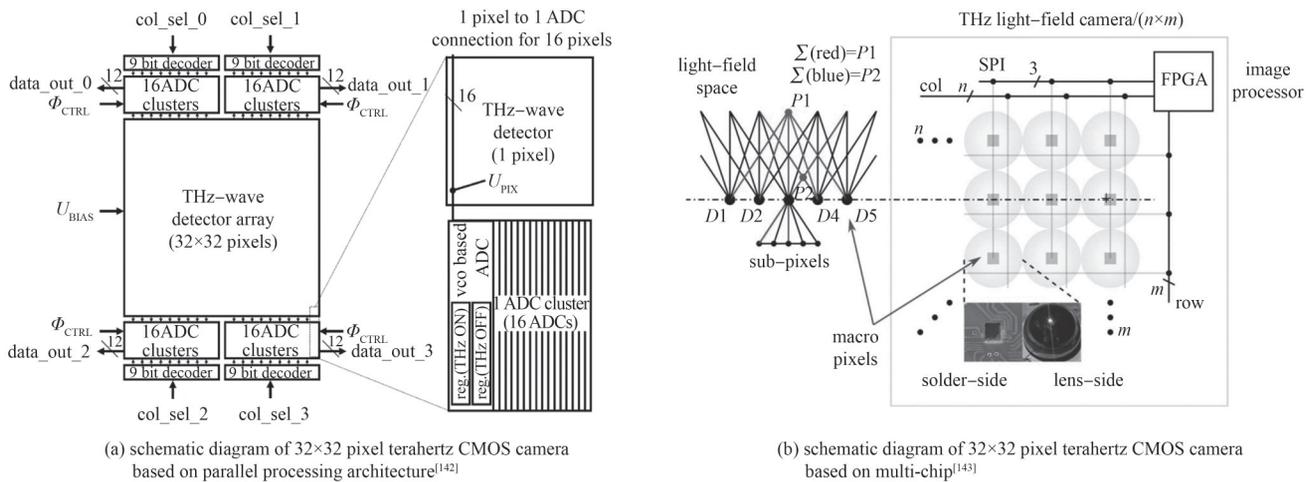


Fig.6 Large-scale terahertz CMOS camera
图 6 大规模太赫兹 CMOS 相机

3.2 太赫兹单像素与压缩感知成像

太赫兹相机虽可大幅加速太赫兹成像, 但其高成本和对高功率源的需求限制了其进一步应用。太赫兹单像素成像技术则基于单个太赫兹探测器, 利用光学编码和计算成像方法实现目标成像。可利用空间光调制器调节分辨率, 具有远低于太赫兹相机的成本和更高的灵活性。太赫兹单像素成像无需机械扫描装置, 显著提升了成像速度, 利用压缩感知(Compressive Sensing, CS)算法还能以较低采样率实现高质量的成像效果, 进一步加速太赫兹成像。这些优势使其十分适用于高分辨力、高帧率实时太赫兹成像。

3.2.1 太赫兹单像素成像

太赫兹单像素成像的主要原理是按照一定规律对太赫兹信号进行空间光强度编码, 利用编码后的光束对样品进行成像。用单像素太赫兹探测器逐步对与样品作用后的信号光强总和进行记录, 并通过相应的重构算法计算出目标图像。其本质是通过多个光场模式进行调制和探测, 将物体的图像表示为一组已知的光场模式的线性组合, 如式(4)所示:

$$y = \Phi x + \varepsilon \tag{4}$$

式中： \mathbf{x} 为待测图像信号的 N^2 阶列向量，可由 $N \times N$ 阶图像矩阵 \mathbf{X} 向量化得到， $N \times N$ 表示图像的像素数； Φ 为 $N^2 \times N^2$ 测量矩阵，表示对测量信号的光场强度调制； ε 为噪声； \mathbf{y} 为一个包含所有测量结果的 N^2 阶列向量，可表示为：

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(t) \\ \mathbf{y}_2(t) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{N^2}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{y}_i(t)$ 为第 i 次测量结果，可进一步表示为：

$$\mathbf{y}_i(t) = \phi_i \odot \mathbf{X} \quad (6)$$

式中： ϕ_i 为每一次测量采用的掩码矩阵，由测量矩阵 Φ 的第 i 行矩阵化得到； \odot 为克罗内克积。

一个典型的太赫兹单像素成像系统包括太赫兹源、空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)、单像素太赫兹探测器及控制与信号模块。其中，SLM用于实现光束的动态调制，常见的SLM包括数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)和液晶SLM。最基础的单像素成像方案是将探测信号与调制光场模式直接相关，利用 N^2 个掩码进行 N^2 次测量，得到包含 $N \times N$ 个像素点的成像结果，其中每个掩码 ϕ_i 分别选通第 i 个像素点区域内的光束，相当于直接对成像光束每个像素点的光强进行记录。在该方案中，所采用的测量矩阵 Φ 为单位矩阵，代入式(4)可得式(7)，即根据测量数据可直接获取成像图案。

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \varepsilon \quad (7)$$

以上述基础的太赫兹单像素成像方法为例，对于一个 $N \times N$ 像素的图像，与扫描式成像方法相比，相当于用切换 N^2 次掩码替代了 N^2 次扫描。由于SLM器件的发展，目前已可实现高达几千赫兹的掩码切换速度，使成像速度大幅提升。

上述的空间光调制模式虽简单直接，易于重建，但由于选通光束的衍射效应，相邻像素点之间的互干扰较为严重，且每个像素点只有很弱的光强通过，对重建图像的质量有很大影响。因此实际成像系统中需采用其他的空间光调制模式，目前研究较多的主要有随机散斑矩阵、傅里叶变换矩阵和哈达玛正交矩阵。其中，随机散斑矩阵主要用于计算关联成像^[149]，傅里叶变换矩阵则主要用于傅里叶光学成像^[150]。但这些调制矩阵均为灰度值矩阵，受限于SLM的光束选通特性，在用于实际单像素成像系统时其他调制矩阵需量化为二值矩阵，导致精确度降低，并且通常需要高于像素数的采样次数，增加了成像时间。而正交哈达玛矩阵为二值矩阵，其所形成的掩码之间两两正交、互不相关，具有良好的抗噪声性能。此外，哈达玛正交矩阵还满足压缩感知理论中的有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)，十分有利于扩展为CS成像，能够在低采样率下实现高质量成像。因此在太赫兹单像素成像系统中，通常采用哈达玛正交矩阵作为空间光调制矩阵。哈达玛正交矩阵的构造可依据Sylvester递归方法进行，设 \mathbf{H}_n 是一个 $n \times n$ 的哈达玛正交矩阵，则一个 $2n \times 2n$ 的哈达玛正交矩阵 \mathbf{H}_{2n} 可通过式(8)构造，其中 $n = 2^k$ ：

$$\mathbf{H}_{2n} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n & \mathbf{H}_n \\ \mathbf{H}_n & -\mathbf{H}_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2.2 太赫兹压缩感知成像

单像素成像的主要优点之一是能够应用CS理论进行加速，利用该理论可解决欠采样情况下稀疏信号的重构问题，在测量次数远小于像素点数的情况下进行成像。与传统单像素成像方式相比，压缩感知成像极大节省了成像系统采集、传输和存储图像所需的时间，是面向太赫兹实时成像的重要技术。压缩感知成像算法的数学模型可直接采用式(6)~式(8)的单像素成像算法模型表示，区别在于，由于CS理论对待重构信号稀疏性的要求，式(6)中图像 \mathbf{x} 需由稀疏基 Ψ 进行稀疏表示，如式(9)所示：

$$\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s} \quad (9)$$

式中 \mathbf{s} 为原始图像 \mathbf{x} 在稀疏基 Ψ 下的稀疏系数向量。将式(9)代入式(4)可得：

$$\mathbf{y} = \Phi \Psi \mathbf{s} + \varepsilon = \mathbf{A} \mathbf{s} + \varepsilon \quad (10)$$

式中 $\mathbf{A} = \Phi \Psi$ 。常用的稀疏基 Ψ 有离散余弦变换基、离散傅里叶变换基和离散小波变换基。此外，测量矩阵 Φ 通常采用哈达玛正交矩阵或其重排序形式^[151-153]。在压缩感知模型中，对于一个包含 $N \times N$ 个像素点的图像，允许

Φ 的维度为 $M \times N^2$, 其中 $M < N^2$, 从而突破奈奎斯特定理实现降采样。使用哈达玛正交矩阵的一些重排序结构也是为了提高其在低采样率下重构图像的质量, 如俄罗斯套娃型^[151]、沃尔什型^[152]和切蛋糕型^[153]。

求解 CS 问题可采用凸优化类算法, 可表示为:

$$\hat{s} = \arg \min \|s\|_0 \text{ s.t. } y = As \quad (11)$$

式(11)是一个 NP-hard 的 0 范数最小化问题, 无法直接求解。在调制矩阵 Φ 满足 RIP 准则时, 式(11)可等价于 1 范数最小化问题:

$$\hat{s} = \arg \min \|s\|_1 \text{ s.t. } y = As \quad (12)$$

当样本数 $M \geq O\left(k \log\left(\frac{N^2}{k}\right)\right)$ 时, 可正确重建图像, 其中 k 表示信号稀疏度。求解式(12)可采用凸优化算法如

迭代硬阈值算法、布雷格曼算法、全变差分算法等。常用的求解方法还包括迭代类算法, 如匹配追踪算法、正交匹配追踪算法、压缩采样匹配追踪(Compressed Sampling Matching Pursuit, CoSaMP)算法等。

在太赫兹 CS 成像中, 首要问题是如何利用空间光调制器实现对太赫兹光束的模式编码。2008 年, W L Chan 等^[154]首次实现太赫兹压缩感知成像, 采用的空间光调制方案是使用蚀刻的金属板。每个金属板上蚀刻有 32×32 像素数的 0~1 随机掩码, 每个像素大小为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 成功实现对太赫兹光束的二元调制, 并在降采样情况下获取了重建图像。但这种空间光调制方案缺乏灵活性, 每一个掩码都需预先蚀刻在金属板上, 并需采用机械方法切换, 限制了系统成像的速度。基于该方案的一种改进是利用一个刻有一系列掩码图案的旋转金属圆盘进行空间光调制, 由于省去了切换掩码的时间, 极大提升了信号采集速度^[155]。该研究同样采用 32×32 像素数的掩码, 使用光导天线作为太赫兹脉冲发射器和接收器, 可在 16% 采样率下实现 80 s 每幅图的成像速度, 极大提升了太赫兹成像的速度, 其成像系统和结果如图 7 所示。文献[156]中也采用了刻有所有掩码矩阵的金属板进行空间光调制, 并采用可调谐的太赫兹脉冲源, 在 20% 采样率下实现了 1.4~2.0 THz 频率范围内的 CS 成像, 并在 1.7 THz 附近获取了最佳成像信噪比。

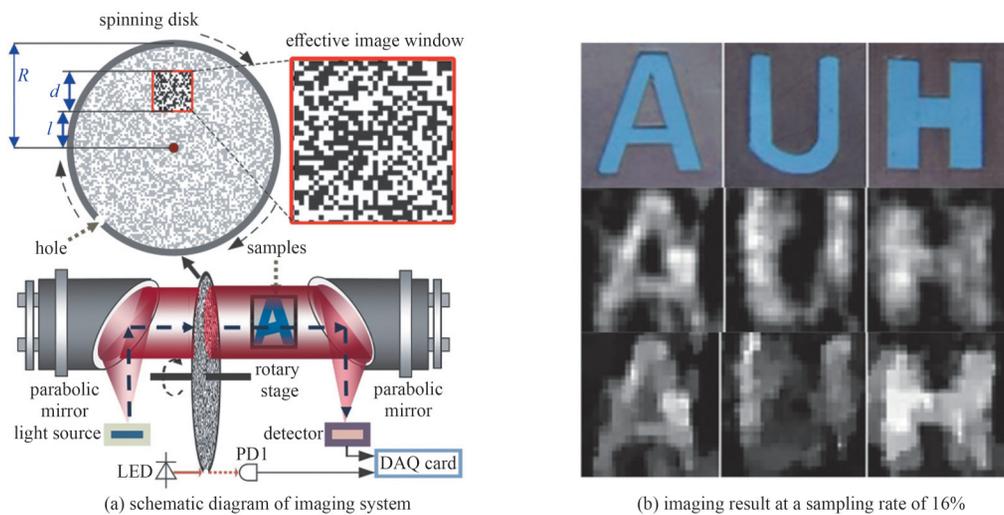


Fig.7 THz CS imaging based on a spinning disk^[156]
图 7 基于旋转金属盘调制的太赫兹 CS 成像^[156]

使用金属板进行空间光调制不仅成像速度难以获得进一步提升, 成像分辨率也受限于金属板的加工精确度, 并且也不利于系统轻量化和集成化。因此, 随着半导体器件的发展, 基于载流子激发的光控半导体逐渐成为太赫兹空间光调制的替代方案^[157]。在这种调制方案中, 首先利用 SLM 对泵浦光束(通常采用可见光或红外光)进行空间调制, 得到结构化的编码泵浦光束; 然后将调制后的泵浦光束照射到光控半导体, 有光的区域在半导体表面激发出载流子, 半导体的载流子激发区域会吸收或反射太赫兹光束, 未激发区域会选通太赫兹光束。通过这种方式使太赫兹光束表现出与掩码图案相同的空间结构, 实现了二值化强度调制。具体过程如图 8 所示。

CHEN 等^[102]首先采用了这种空间光调制方法, 将其用于实现太赫兹近场成像的动态孔径。D Shrekenhamer 等^[158]首次提出基于该空间光调制方案的太赫兹单像素成像。他们通过 DMD 对泵浦光束进行编码, 采用高电阻硅

晶片进行太赫兹空间光调制, 利用不同复杂程度(63 像素到 1 023 像素)的掩码对金属样品进行成像试验, 实现了 63 像素图像 0.5 frames/s 的成像速度, 展现了基于半导体的空间光调制技术运用于太赫兹单像素成像时的灵活性和高效性。但该工作仅利用了基础的单像素成像原理, 成像速度还有进一步提升的空间。S Augustin 等^[159]采用一个薄膜晶体管液晶显示器对卤素灯光束进行编码, 随后照射到锗半导体上激发出光图案, 进而对反射太赫兹光束实现空间光调制。该系统在接收端采用高莱盒单元探测器进行接收, 实现了 350 GHz 的 CS 成像; 采用 CoSaMP 算法进行重建, 将采样率降至约 1/3 而不影响成像质量。在文献[160]中, Y Shang 等同样采用基于光激发高阻硅的空间光调制, 并将逆菲

涅尔衍射积分用于消除太赫兹 CS 成像中的衍射效应, 准确重建了太赫兹时域图像和光谱图像, 进一步提高了太赫兹 CS 成像的实用性。但在基于光控半导体的调制方案中, 根据 Drude 模型, 光载流子达到饱和需要一定时间, 在饱和之前半导体上的光图案对太赫兹光束的调制深度受限, 这限制了成像速度的进一步提升。此外, 在光载流子达到饱和后, 光控半导体对太赫兹波束的调制深度也有待提高, 以获得更好的成像信噪比。在文献[161]中, R I Stantchev 等提出了一种后处理算法, 可在光载流子饱和前进行采样进而拟合出更精确的采样结果。此外, 他们还研究了太赫兹光束在高阻硅上反射或透射时不同的调制深度, 并提出了一种全内反射方案, 实现了更高的太赫兹光束调制深度, 提升了成像质量。最后采用 CS 算法, 不考虑信号采集和后处理算法时间, 理论上能在 40% 采样率下对 32×32 像素图像实现 6 frames/s 的成像速度。为进一步提升太赫兹 CS 成像速度和质量, LI 和 FANG 等^[162]提出一种基于光子学的连续波太赫兹 CS 成像系统。该系统基于高响应速度的光控半导体进行调控, 且连续波太赫兹信号使成像速度不受脉冲重频限制, 考虑到信号采集和后处理时间, 成像速度可达 0.1 frames/s, 此外, 该系统基于 UTC-PD 的光子学连续波太赫兹生成方法和基于 SBD 的自混频接收, 在低采样率条件下可得到较高的成像信噪比。

近年来, 随着超材料的发展, 基于超表面空间光调制的太赫兹 CS 成像也迅速发展。2014 年, C M Watts 等^[163]首次将基于超材料的 SLM 用于太赫兹 CS 成像。该 SLM 具有 64 个像素, 每个像素单元由一个 18×18 的超材料吸收体(Metamaterial Absorber, MMA)阵列构成, 通过调控 MMA 的偏压电流可实现对太赫兹光束的空间编码。在文献[164]中, LI 等提出基于超表面的双频太赫兹 CS 成像, 他们利用超表面在两个不同频点的互补吸收特性, 无需重复测量即可实现差分哈达玛掩码调制, 节省了成像时间。此外, 他们还提出一种自校准压缩感知算法, 利用成像视场的先验信息, 如太赫兹源强度分布, 获得了更好的重建图像质量。

上述研究工作大多基于太赫兹信号的幅度信息进行 CS 成像, 实际上, CS 技术同样适用于太赫兹相位成像和太赫兹光谱成像^[151,165]。此外, CS 可与多种成像技术结合加速成像过程, 如高光谱成像^[166]、飞行时间(Time Of Flight, TOF)成像^[167]、近场成像^[164,168-170]、层析成像^[171]以及阵列成像^[172]。凭借其灵活性、高效性和易于集成的优势, 基于 CS 的太赫兹单像素成像已成为实现太赫兹实时成像的重要解决方案。

目前, 限制太赫兹单像素成像发展的主要因素包括: 调制速率的瓶颈限制了成像速度的进一步提升, 以及重构算法计算开销较大。为满足高分辨力和高帧率的太赫兹实时成像需求, 亟需开发更先进、快速的重构算法。同时, 研究人员也在积极探索具有更高响应速度的太赫兹空间光调制器^[173], 并采用深度学习辅助的 CS 算法以进一步提升成像效率^[174-177]。

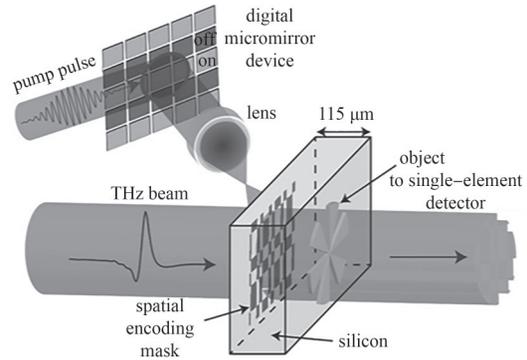


Fig.8 Schematic diagram of spatial light modulation based on photo-sensitive semiconductor^[158]

图8 基于光控半导体的空间光调制方案^[158]

表2 太赫兹阵列成像和太赫兹单像素成像对比

Table2 Comparison between terahertz array and terahertz single-pixel imaging

| | terahertz array | terahertz single-pixel imaging |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| imaging speed | real-time (30 frames per second) | relatively slow(5 frames per second) |
| post-processing complexity | low | high |
| detection sensitivity | low | high |
| spatial resolution | $>\lambda$ | $<\lambda$ ($\lambda/133$) |
| noise immunity | low | high |
| flexibility | low | high |
| cost | high | low |

太赫兹阵列成像和太赫兹单像素这两种技术方案的技术指标优劣和应用场景总结如表 2 所示(表中 λ 为探测信号的波长)。太赫兹阵列成像的主要优势在于较高的像素数和成像速度, 可通过并行的方式一次性获取样品的整体图像, 无需复杂的后处理算法。但太赫兹阵列成本高, 且受限于衍射效应和探测器阵元性能, 灵敏度相对较低, 主要适用于超高速太赫兹成像场景且对成像质量要求不高的场景。太赫兹单像素成像的主要优势在于较低的硬件需求和成本, 以及更高的空间分辨力, 且具有灵活可调的像素数。若采用先进的空间光调制器和压缩感知成像算法也可达到每秒多帧的成像速度, 主要适用于对成本敏感、对便携性要求较高的太赫兹成像场景。

4 太赫兹成像的应用

目前, 太赫兹成像已广泛用于艺术品检测、生物医学、工业检测领域, 本文将介绍在这些领域应用中两种较常见的成像方式: 太赫兹 TOF 成像和太赫兹计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)成像。

4.1 太赫兹 TOF 成像

在太赫兹 TOF 成像系统中, 发射的太赫兹脉冲到达样品表面后部分被反射, 部分穿透样品并从不同介质界面返回, 利用发射光脉冲与反射光脉冲之间的时间延迟可以计算物体到传感器之间的距离, 从而得到待测物体表面的深度图像或物体内部结构图像。其原理如式(13)所示:

$$d = \frac{c\Delta t}{2n} \tag{13}$$

式中 d 、 c 、 Δt 、 n 分别表示目标距离、真空中光速、脉冲时延和介质折射率。太赫兹 TOF 成像是一种太赫兹脉冲成像方式, 该系统可认为是对 THz-TDS 系统的扩展。分束器将飞秒激光器产生的激光分成泵浦光和探测光, 泵浦光通过光学或机械斩波器, 或通过太赫兹发射器偏置电压进行调制, 然后聚焦在太赫兹发射器上。随后, 产生的太赫兹辐射准直并聚焦到目标样本上, 当太赫兹脉冲照射目标时, 会从各个界面反射或透射一系列太赫兹脉冲, 这些太赫兹脉冲被透镜或抛物面镜重新准直到太赫兹探测器上被接收。1997 年, D M Mittleman 等^[178]最早将它运用到断层成像中, 通过分析回波脉冲不同峰之间的时延获取了距离域信息, 得到了样品的三维体积图像, 如图 9(a)~(b)所示。

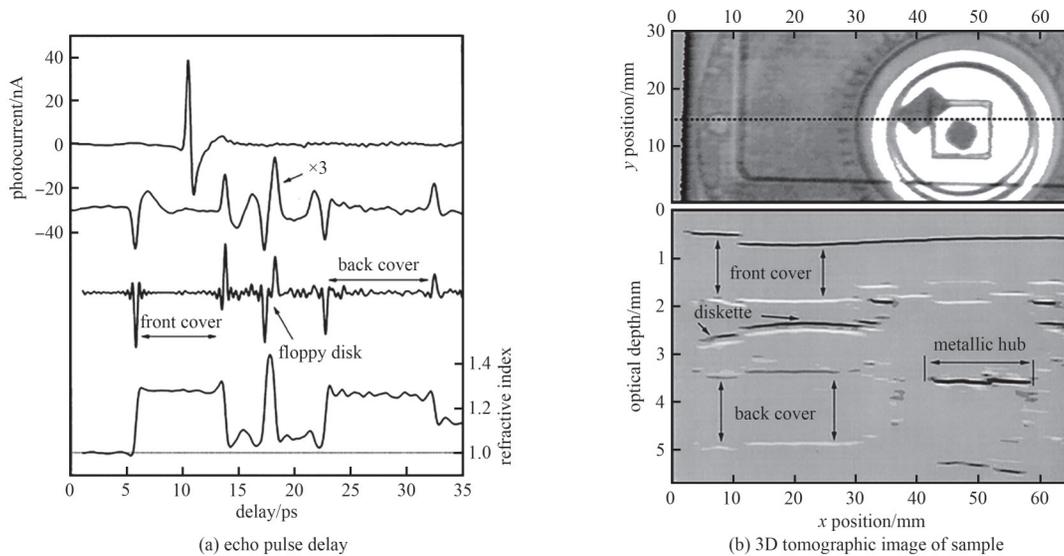
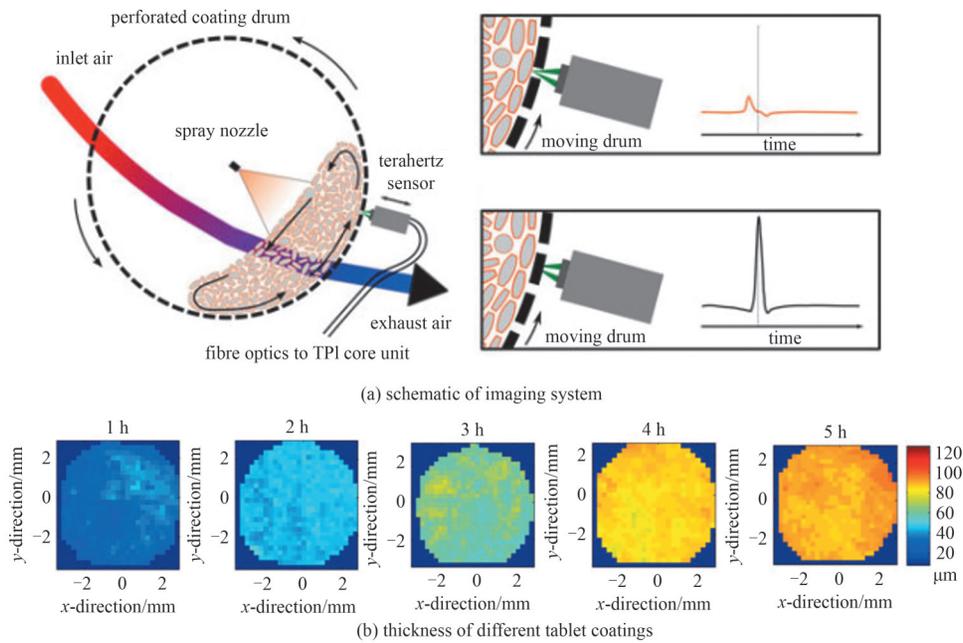
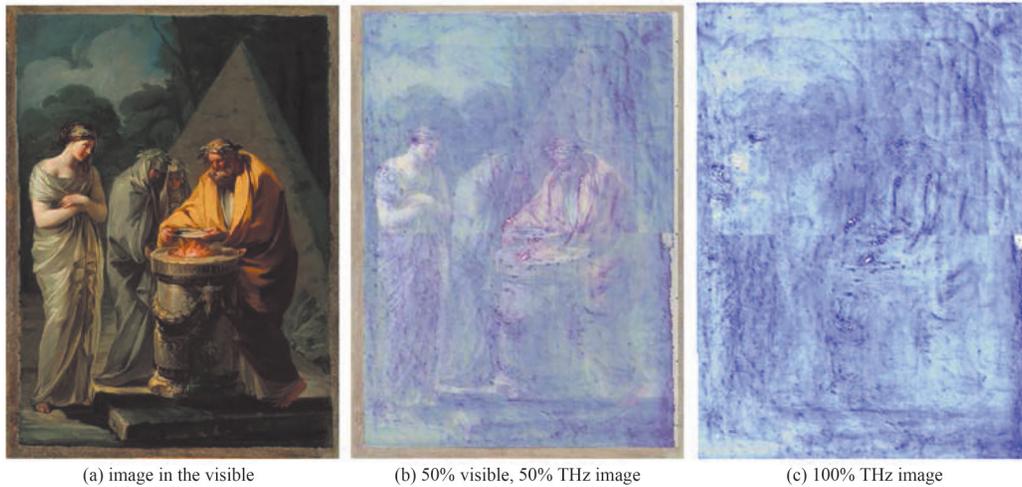


Fig.9 TOF-based 3D imaging^[178]
图9 TOF 三维成像^[178]

目前, TOF 系统主要用于医药检测和艺术品检测^[179-182]。在医药检测中, 主要用于解决药品表面涂层在制备过程中的质量、厚度控制问题。相较于可见光波段, 太赫兹波在大多数药片中是半透明的, 因此可以实现高穿透深度的无损成像。A J Fitzgerald 等^[180]将 TOF 系统用于布洛芬药片的涂层检测, 在 3 THz 实现了 150 μm 横向分辨力和 30 μm 轴向分辨力, 成功区分 2 种品牌药片。因为在距离域分辨力上的显著优势, TOF 被大量运用到药品涂层厚度检测中, 文献[183-184]均实现了快速、微米精确度的药品涂层分辨, 图 10(a)和图 10(b)展示了文献[184]中所采用的 TOF 成像方法和对药品的不同涂层成像结果。

Fig.10 Demonstration of TOF tablet coating resolution^[184]图 10 TOF 药品涂层分辨^[184]

TOF 的另一大重要应用则是在艺术品检测和修复中，由于 TOF 成像无需与样品接触且无电离辐射，不会对样品造成破坏，并且对不同材料的介电特性具有高敏感性，可区分不同物质的成分和特性，在古艺术品特别是画作的层析成像中可起到重要作用^[185-186]。2013 年，C Seco-Martorell 等^[187]利用 TOF 系统对西班牙艺术家 Goya 在 1771 年创作的一幅画作进行成像和分析，仅通过幅度成像就获取了可见光波段无法看到的图像，如图 11 所示。此外太赫兹图像还提供了绘画的“纹理感”，其中笔触的强度、颜料的密度和画布的结构特征都显示得更加清晰。

Fig.11 Demonstration of TOF painting detection^[187]图 11 TOF 画作检测^[187]

TOF 除了太赫兹波段独特性质在幅度成像上带来的优势，还在于可以通过波峰时延在画作的不同深度生成截面获取可见光波段无法显示的图像。文献[188]中，研究人员用 TOF 测量了一幅油画的隐藏颜料层厚度信息，由于画布和颜料的物理特性，表层下的多层涂层的厚度信息在可见光、X 光和红外波段都无法被提取；文献[189]中，研究人员对丹麦画家 Nicolai Abildgaard 于 18 世纪创作的肖像画的不同涂层进行成像，并提出一种适用于不平整表面的太赫兹脉冲提取算法，成功重构了画作底层隐形的素描轮廓。

此外，TOF 在汽车工业检测中也有着极大应用潜力。文献[190]中，TOF 被用来测量金属和非金属基材上多达 4 层的汽车油漆的厚度和质量，在得到 18 μm 厚度分辨率的同时，确定了各个油漆层的折射率和消光系数。

2021年, J L M Van Mechelen 等^[191]开发出一种基于 TOF 的传感器, 并将其用于汽车工业中干燥油漆涂层的材料特性分析, 验证了系统的鲁棒性和灵敏性。这些工作表明, 相比其他已有的汽车工业中的无损检测技术, 如超声波和涡流测量, TOF 技术显示出不俗甚至更优越的性能。

4.2 太赫兹 CT 成像

CT 成像技术能够从多个方向获取被测物体的一系列二维图像数据, 并通过重建生成高精确度的三维图像, 从而详细呈现物体的内部结构。目前, X 射线 CT 成像已广泛用于医学影像和工业检测领域。虽然 X 射线具有强大的穿透能力, 但其放射性对人体健康的潜在影响不可忽视, 特别是在需要频繁检测的场景中并不适用。相比之下, 太赫兹波段的电磁波具有较低的电离能力, 可安全、无害地提取人体或生物组织信息, 尤其是在检测敏感组织(如肿瘤或皮肤)时, 太赫兹波可避免传统 X 射线或其他高能辐射技术可能带来的健康风险。因此, 太赫兹 CT 成像在医学成像领域展现出巨大的应用潜力。近年来, 随着技术的发展和需求的增长, 关于太赫兹 CT 成像的研究也不断涌现。

CT 成像的原理是: 首先记录从各个角度经待测物体透射的电磁波电场信息, 即 Radon 变换过程:

$$R_{\rho, \theta}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta) dx \quad (14)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像; θ 为投影角度; ρ 为投影线到远截面距离; $R_{\rho, \theta}(f)$ 为投影结果。

随后, 通过滤波反投影(Filtered Back Projection, FBP)算法、迭代类算法或基于深度学习的方法从所获取的数据重建原物体的三维图像。为应用于太赫兹频段, 研究新的算法和处理技术以适应太赫兹波或待测物质的特性是十分必要的。2002年, B Ferguson 等^[192]首次将太赫兹频段的电磁波用于 CT 成像, 如图 12 所示。A Brahm 等^[193]利用 THz-TDS 系统获取待测物的光谱信息对葡萄糖和乳糖样品进行分辨, 并采用时域 FBP 算法重建出样品的截面图。在太赫兹 CT 成像中, 对成像质量的一大限制来自于样品本身对太赫兹波的透明度不足, 因此在文献[193]的基础上进行改进, 提出一种基于小波变换的识别和定位算法^[194], 该方法适用于在太赫兹频段具有宽吸收光谱而无特征峰的待测物质。

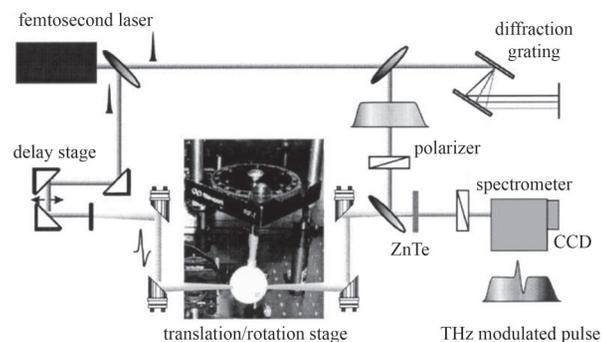


Fig.12 Schematic diagram of the first terahertz CT imaging system^[197]
图 12 太赫兹 CT 成像系统^[197]

此外, X 光的波长远小于待测物尺寸, 可以忽略波束的自衍射效应视其为平行光。但太赫兹波的波长可达毫米级, 因此研究人员认为应该用高斯光束对其进行近似而不是平行光, 并在其所提出的算法模型中引入高斯光束强度分布, 获得了更好的重建效果^[195]。文献[196]中, B Recur 等将最初用于 X 光 CT 的图像重建方法——最大似然法, 改进为包含高斯光束传播约束的算法, 以更适用于太赫兹 CT 成像。除利用高斯波束模型, 基于贝塞尔光束无衍射特性的重建算法也被提出, 以提升图像重建质量^[197-198]。WANG 等提出一种连续波太赫兹 CT 成像, 利用轴棱镜产生贝塞尔太赫兹光束。与传统高斯光束相比, 贝塞尔光束可扩展连续波太赫兹 CT 系统的景深。此外, SHEN 等^[199]还提出基于扇形波束的太赫兹 CT 成像, 同样能提供更大的景深, 并且由于波束具有传播不变的焦线, 允许使用线性探测阵列, 可以加快成像速度。太赫兹 CT 成像所面临的另一大问题是屈光效应, 即太赫兹波在穿过折射率相差过大的物质界面时发生折射和传播路径改变, 导致图像出现几何畸变。CHEN 等^[200]提出一种基于折射率匹配的太赫兹 CT 成像方法, 在低吸收液体中进行样品的三维成像, 有效解决了高折射率物体折射效应和非涅尔反射损耗问题, 并结合消除液体吸收和抑制伪影的数据处理, 显著提高了重建图像质量。文献[201]中, P Fosoder 等还提出了基于相位信息抑制重建图像中衍射伪影的办法。为进一步提高太赫兹 CT 成像质量, 可引入计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)模型并结合 CAD 模型提供的信息进行去伪影优化, 进一步提高重建图像的整体精确度^[202]。A Duhant 等^[203]不仅考虑了太赫兹波束的高斯分布提出辐射与待测物体之间相互作用的新模型, 还提出基于重建图与已知样品 CAD 模型偏差的优化算法, 获得了更高的成像质量。为加快太赫兹 CT 成像速度, WANG 等^[204]提出利用稀疏角度进行图像重建, 压缩了 75% 的数据采集时间, 并采用全变分(Total Variation, TV)最小化迭代算法有效抑制了稀疏角度重建中产生的噪声、伪影和形状畸变。上述太赫兹 CT 成像主要基于电子学连续波源或脉冲源, 其中电学连续波源的带宽和频率可调范围受限, 脉冲源则信噪比较

低且信号处理复杂,因此 YANG 等提出基于光子学的连续波太赫兹 CT 成像,利用光频梳和 UTC-PD 产生太赫兹信号,并提出一种用于处理汉字型样品的成像算法,在 330 GHz 实现 0.5 mm 的成像精确度。

太赫兹 CT 成像作为一种新兴成像技术,在传统 CT 基础上结合了太赫兹波段的独特物理特性,具有非侵入性、无害等优势,尤其适用于生物医学领域。目前,在含水量较高的生物组织中太赫兹波穿透深度有限,因此限制了太赫兹 CT 成像在含水物体中的深层监测应用。

5 总结与展望

本文对主要的太赫兹成像技术的主要研究进展进行了综述。根据所采用太赫兹信号的种类,太赫兹成像可大致分为脉冲和连续波两种基础机制。基于这两种机制最先研究的栅格扫描式成像模式,原理简单且具有良好的性能,但成像速度慢且机械结构较复杂。由此衍生出多种成像模式,典型的有太赫兹飞行时间成像、太赫兹近场成像、太赫兹 CT 成像,以及太赫兹相机成像与太赫兹单像素成像快速成像方案。本文所涉及的太赫兹成像技术和应用总结如图 13 所示。

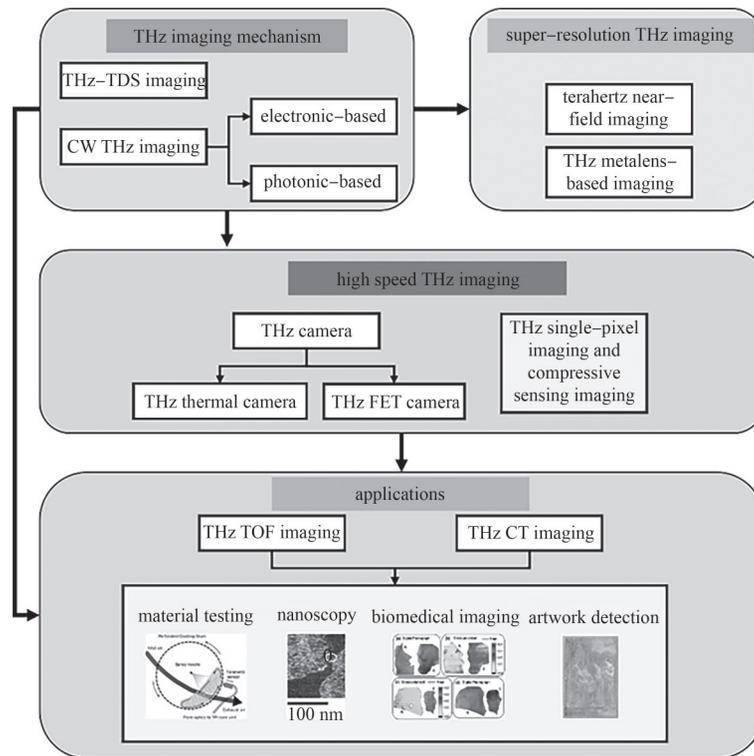


Fig.13 Overview diagram of terahertz imaging technology and applications

图 13 太赫兹成像技术与应用总览图

每种成像技术都有其独特的优势,适用于不同的应用场景,特别是在实际应用中它们还面临一些共同挑战:

1) 太赫兹成像系统所需部分器件和调试设备制造工艺复杂,价格昂贵,导致系统成本高,成为推广应用的一大阻碍。如脉冲式太赫兹源需要超短脉冲激光器与高效的太赫兹发射元件;连续波太赫兹光电收发器件则需要高灵敏度的光电半导体材料,且其制作过程中对工艺精确度要求极高;太赫兹探测器阵列尤其是 FET 阵列通常需要大规模集成制造技术等。突破关键器件性能的瓶颈,降低制造成本,是未来太赫兹成像技术发展的关键。

2) 太赫兹波和太赫兹探测器件对湿度、温度等环境因素较为敏感,在复杂或较恶劣环境下尤其是工业检测方面的应用受到限制。如水分子在太赫兹频段有较强的吸收作用,空气中较高的水蒸气浓度会导致太赫兹信号的衰减,从而影响潮湿环境下的成像质量;温度过高可能导致太赫兹探测器的噪声增加,降低成像信噪比,甚至损坏器件。这些问题都对太赫兹成像的信噪比和可靠性提出了更高要求,尤其是对工业检测具有潜力的技术如 TPI、太赫兹 CT 和太赫兹阵列成像等技术。

3) 对于高吸收材料,太赫兹波的穿透深度受限,限制了其应用范围。如,金属材料由于具有良好的导电性,会在太赫兹波的作用下产生强烈的反射,使太赫兹波几乎无法穿透金属表面,从而无法用于金属内部的成像或检测,如太赫兹 CT 对金属结构内部成像和太赫兹 TDS 提取金属物质的介电性质;水分含量较高的物质(如生物

组织、木材等)则会对太赫兹波产生较强的吸收。在这类材料上,太赫兹成像技术的适用性受到极大挑战,特别是太赫兹CT在生物医学成像或检测食品、水分等材料中的应用。

4) 太赫兹成像的速度仍需提高以适用于高帧率、高分辨力实时成像场景。尽管已出现太赫兹阵列和太赫兹压缩感知成像等高速太赫兹成像方案,但其成像速度仍远低于成熟的光学成像技术。在需要实时监测或高速成像的应用中(如实时的安全检查、工业检测和医学成像),成像速度成为了制约其应用的重要因素,亟需进一步研究加速太赫兹成像的技术方案。

针对这些问题,可从以下几个角度考虑太赫兹成像技术的进一步发展。

1) 通过多模态融合进一步拓宽其应用范围并提升性能,如压缩感知成像与TPI、阵列成像、光谱成像、光声成像^[205]等技术结合,或是基于数据驱动的人工智能技术与其他成像技术相结合,以提高系统信息获取能力,节约成本,加速成像;

2) 研发更高功率的太赫兹源、更敏感的太赫兹探测器等器件,以及研究更先进的低噪声太赫兹收发系统,提高成像系统的信噪比、抗干扰性和鲁棒性;

3) 利用超表面^[206]、半导体空间光调制器等器件,提高对太赫兹波束的调控效率,扩展太赫兹波束的辐射方式,提高光学系统效率;

4) 针对影响成像系统正常运行的环境因素采取补偿措施,如环境温湿度控制系统、自动校准机制、信号处理算法优化等,以确保成像过程中的稳定性和可靠性,这对于工业应用或移动设备,尤其是要求长期稳定运行的场景尤为重要。

总体而言,太赫兹成像技术已展现出很好的应用潜力,随着新技术、新器件和系统的不断发展和进步,将在医疗成像、工业检测、文化遗产保护、食品安全监测等诸多方面发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] SMITH P R, AUSTON D H, NUSS M C. Subpicosecond photoconducting dipole antennas[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988,24(2):255–260. DOI:10.1109/3.121.
- [2] FATTINGER C, GRISCHKOWSKY D. Terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(6): 490–492. DOI: 10.1063/1.100958.
- [3] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995,20(16):1716–1718. DOI:10.1364/OL.20.001716.
- [4] ZIMDARS D, WHITE J S. Terahertz reflection imaging for package and personnel inspection[C]// *Terahertz for Military and Security Applications II*. Orlando, Florida, US: Defense and Security, 2004:78–83. DOI:10.1117/12.562216.
- [5] ZHONG Hua, XU Jingzhou, XIE Xu, et al. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005,5(2):203–208. DOI:10.1109/JSEN.2004.841341.
- [6] KATLETZ S, PFLEGER M, PÜHRINGER H, et al. Efficient terahertz en-face imaging[J]. *Optics Express*, 2011,19(23):23042–23053. DOI:10.1364/OE.19.023042.
- [7] 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. DOI:10.1364/OE.23.005027.
- [8] HARRIS Z B, VIRK A, KHANI M E, et al. Terahertz time-domain spectral imaging using telecentric beam steering and an $f-\theta$ scanning lens: distortion compensation and determination of resolution limits[J]. *Optics Express*, 2020,28(18):26612–26622. DOI:10.1364/OE.398706.
- [9] 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. DOI:10.1364/OE.16.001208.
- [10] BLANCHARD F, DOI A, TANAKA T, et al. Real-time terahertz near-field microscope[J]. *Optics Express*, 2011,19(9):8277–8284. DOI:10.1364/OE.19.008277.
- [11] 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(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(2):176–179.) DOI:10.11805/TKYDA201402.0176.
- [12] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996,2(3):739–746. DOI:10.1109/2944.571775.
- [13] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2001,18(7):1562–1571. DOI:10.1364/josaa.18.001562.

- [14] BOLIVAR P H, BRUCHERSEIFER M, RIVAS J G, et al. Measurement of the dielectric constant and loss tangent of high dielectric-constant materials at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003,51(4): 1062–1066. DOI:10.1109/TMTT.2003.809693.
- [15] WITHAYACHUMNANKUL W, FERGUSON B, RAINSFORD T, et al. Simple material parameter estimation via terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Electronics Letters*, 2005,41(14):800–801. DOI:10.1049/el:20051467.
- [16] PUPEZA I, WILK R, KOCH M. Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2007,15(7):4335–4350. DOI:10.1364/OE.15.004335.
- [17] TOMAINO J L, JAMESON A D, KEVEK J W, et al. Terahertz imaging and spectroscopy of large-area single-layer graphene[J]. *Optics Express*, 2011,19(1):141–146. DOI:10.1364/OE.19.000141.
- [18] TOMAINO J L, JAMESON A D, PAUL M J, et al. High-contrast imaging of graphene via time-domain terahertz spectroscopy[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012,33(8):839–845. DOI:10.1007/s10762-012-9889-7.
- [19] BØGGILD P, MACKENZIE D M A, WHELAN P R, et al. Mapping the electrical properties of large-area graphene[J]. *2D Materials*, 2017,4(4):042003. DOI:10.1088/2053-1583/aa8683.
- [20] SPIES J A, NEU J, TAYVAH U T, et al. Terahertz spectroscopy of emerging materials[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020,124(41):22335–22346. DOI:10.1021/acs.jpcc.0c06344.
- [21] OZAKI Y. Infrared spectroscopy—mid-infrared, near-infrared, and far-infrared/terahertz spectroscopy[J]. *Analytical Sciences*, 2021,37(9):1193–1212. DOI:10.2116/analsci.20R008.
- [22] FU Xiaojian, LIU Yujie, CHEN Qi, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances[J]. *Frontiers in Physics*, 2022(10):3389. DOI:10.3389/fphy.2022.869537.
- [23] AUSTON D H, CHEUNG K P, SMITH P R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles[J]. *Applied Physics Letters*, 1984,45(3): 284–286. DOI:10.1063/1.95174.
- [24] ZHANG X C, AUSTON D H. Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992,71(1):326–338. DOI:10.1063/1.350710.
- [25] ZHANG X C, AUSTON D H. Optically induced THz electromagnetic radiation from planar photoconducting structures[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1992,6(1/4):85–106. DOI:10.1163/156939392X01039.
- [26] JEPSEN P U, JACOBSEN R H, KEIDING S R. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996,13(11):2424–2436. DOI:10.1364/JOSAB.13.002424.
- [27] SHEN Y C, UPADHYA P C, LINFIELD E H, et al. Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters[J]. *Applied Physics Letters*, 2003,83(15):3117–3119. DOI:10.1063/1.1619223.
- [28] SCHNEIDER A, NEIS M, STILLHART M, et al. Generation of terahertz pulses through optical rectification in organic DAST crystals: theory and experiment[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006,23(9):1822–1835. DOI:10.1364/JOSAB.23.001822.
- [29] YEH K L, HOFFMANN M C, HEBLING J, et al. Generation of 10 μJ ultrashort terahertz pulses by optical rectification[J]. *Applied Physics Letters*, 2007,90(17):171121. DOI:10.1063/1.2734374.
- [30] HAURI C P, RUCHERT C, VICARIO C, et al. Strong-field single-cycle THz pulses generated in an organic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2011,99(16):161116. DOI:10.1063/1.3655331.
- [31] VICARIO C, JAZBINSEK M, OVCHINNIKOV A V, et al. High efficiency THz generation in DSTMS, DAST and OH1 pumped by Cr:forsterite laser[J]. *Optics Express*, 2015,23(4):4573–4580. DOI:10.1364/OE.23.004573.
- [32] D'ARCO A, TOMARCHIO L, DOLCI V, et al. Broadband anisotropic optical properties of the terahertz generator HMQ-TMS organic crystal[J]. *Condensed Matter*, 2020,5(3):47. DOI:10.3390/condmat5030047.
- [33] KRESS M, LÖFFLER T, EDEN S, et al. Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves[J]. *Optics Letters*, 2004,29(10):1120–1122. DOI:10.1364/OL.29.001120.
- [34] ROEHLE H, DIETZ R J B, HENSEL H J, et al. Next generation 1.5 microm terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers[J]. *Optics Express*, 2010,18(3):2296–2301. DOI:10.1364/OE.18.002296.
- [35] DIETZ R J B, BRAHM A, VELAUTHAPILLAI A, et al. Low temperature grown photoconductive antennas for pulsed 1 060 nm excitation: influence of excess energy on the electron relaxation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2015, 36(1):60–71. DOI:10.1007/s10762-014-0119-3.
- [36] PAČEBUTAS V, BIČIUNA A, BERTULIS K, et al. Optoelectronic terahertz radiation system based on femtosecond 1 μm laser pulses and GaBiAs detector[J]. *Electronics Letters*, 2008,44(19):1154–1155. DOI:10.1049/el:20081630.
- [37] PAČEBUTAS V, BIČIŪNAS A, BALAKAUSKAS S, et al. Terahertz time-domain-spectroscopy system based on femtosecond Yb:

- fiber laser and GaBiAs photoconducting components[J]. *Applied Physics Letters*, 2010,97(3):031111. DOI:10.1063/1.3458826.
- [38] KOHLHAAS R B,BREUER S,LIEBERMEISTER L,et al. Novel photoconductive antennas based on rhodium doped InGaAs with 637 μ W emitted THz power[C]// *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XIV*. Bellingham:SPIE, 2021:11685. DOI:10.1117/12.2582964.
- [39] NIKOO M S,JAFARI A,PERERA N,et al. Nanoplasma-enabled picosecond switches for ultrafast electronics[J]. *Nature*, 2020, 579(7800):534–539. DOI:10.1038/s41586-020-2118-y.
- [40] PAČEBUTAS V,STANIONYTĖ S,NORKUS R,et al. Terahertz pulse emission from GaInAsBi[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019,125(17):174507. DOI:10.1063/1.5089855.
- [41] KLEINE-OSTMANN T,KNOBLOCH P,KOCH M,et al. Continuous-wave THz imaging[J]. *Electronics Letters*, 2001,37(24): 1167–1462. DOI:10.1049/el:20011003.
- [42] QIN Hua,LI Xiang,SUN Jiandong,et al. Detection of incoherent terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017,110(17):171109. DOI:10.1063/1.4982604.
- [43] SHI Jia,WANG Yuye,XU Degang,et al. Terahertz imaging based on morphological reconstruction[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017,23(4):1–7. DOI:10.1109/JSTQE.2017.2649461.
- [44] YANG Xiang,SHI Jia,WANG Yuye,et al. Label-free bacterial colony detection and viability assessment by continuous-wave terahertz transmission imaging[J]. *Journal of Biophotonics*, 2018,11(8):e201700386. DOI:10.1002/jbio.201700386.
- [45] 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. DOI:10.1364/AO.53.001406.
- [46] WANG Yuye,SUN Zhongcheng,XU Degang,et al. A hybrid method based region of interest segmentation for continuous wave terahertz imaging[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2019,53(9):095403. DOI:10.1088/1361-6463/ab58b6.
- [47] SALHI M A,PUPEZA I,KOCH M. Confocal THz laser microscope[J]. *Journal of Infrared,Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, 31(3):358–366. DOI:10.1007/s10762-009-9590-7.
- [48] KIM G J,KIM J I,JEON S G,et al. Enhanced continuous-wave terahertz imaging with a horn antenna for food inspection[J]. *Journal of Infrared,Millimeter and Terahertz Waves*, 2012,33(6):657–664. DOI:10.1007/s10762-012-9902-1.
- [49] DE CUMIS U S,XU J H,MASINI L,et al. Terahertz confocal microscopy with a quantum cascade laser source[J]. *Optics Express*, 2012,20(20):21924–21931. DOI:10.1364/OE.20.021924.
- [50] MAESTRINI A,THOMAS B,WANG H,et al. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2010,11(7–8):480–495. DOI:10.1016/j.crhy.2010.05.002.
- [51] DOBROIU A,YAMASHITA M,OHSHIMA Y N,et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. *Applied Optics*, 2004,43(30):5637–5646. DOI:10.1364/AO.43.005637.
- [52] MINEO M,PAOLONI C. Corrugated rectangular waveguide tunable backward wave oscillator for terahertz applications[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010,57(6):1481–1484. DOI:10.1109/TED.2010.2045678.
- [53] HE W,ZHANG L,BOWES D,et al. Generation of broadband terahertz radiation using a backward wave oscillator and pseudospark-sourced electron beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2015,107(13):133501. DOI:10.1063/1.4932099.
- [54] KÖHLER R,TREDICUCCI A,BELTRAM F,et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002,417(6885): 156–159. DOI:10.1038/417156a.
- [55] BOSCO L,FRANCKIÉ M,SCALARI G,et al. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K[J]. *Applied Physics Letters*, 2019,115(1):010601. DOI:10.1063/1.5110305.
- [56] KHALATPOUR A,PAULSEN A K,DEIMERT C,et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1):16–20. DOI:10.1038/s41566-020-00707-5.
- [57] KHALATPOUR A,TAM M C,ADDAMANE S J,et al. Enhanced operating temperature in terahertz quantum cascade lasers based on direct phonon depopulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2023,122(16):161101. DOI:10.1063/5.0144705.
- [58] BELKIN M A,CAPASSO F,BELYNIN A,et al. Terahertz quantum-cascade-laser source based on intracavity difference-frequency generation[J]. *Nature Photonics*, 2007,1(5):288–292. DOI:10.1038/nphoton.2007.70.
- [59] LU Q Y,SLIVKEN S,BANDYOPADHYAY N,et al. Widely tunable room temperature semiconductor terahertz source[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,105(20):4902245. DOI:10.1063/1.4902245.
- [60] LU Q Y,BANDYOPADHYAY N,SLIVKEN S,et al. Continuous operation of a monolithic semiconductor terahertz source at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,104(22):221105. DOI:10.1063/1.4881182.
- [61] KIM J H,JUNG S,JIANG Y F,et al. Double-metal waveguide terahertz difference-frequency generation quantum cascade lasers with surface grating outcouplers[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,113(16):161102. DOI:10.1063/1.5043095.

- [62] DARMO J, TAMOSIUNAS V, FASCHING G, et al. Imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 1879–1884. DOI:10.1364/OPEX.12.001879.
- [63] NGUYEN K L, JOHNS M L, GLADDEN L, et al. Three-dimensional imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(6):2123–2129. DOI:10.1364/OE.14.002123.
- [64] DEAN P, SHAUKAT M U, KHANNA S P, et al. Absorption-sensitive diffuse reflection imaging of concealed powders using a terahertz quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9):5997–6007. DOI:10.1364/OE.16.005997.
- [65] RAVARO M, LOCATELLI M, VITI L, et al. Detection of a 2.8 THz quantum cascade laser with a semiconductor nanowire field-effect transistor coupled to a bow-tie antenna[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8):083116. DOI:10.1063/1.4867074.
- [66] RAVARO M, JAGTAP V, SANTARELLI G, et al. Continuous-wave coherent imaging with terahertz quantum cascade lasers using electro-optic harmonic sampling[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(9):091107. DOI:10.1063/1.4793424.
- [67] DEAN P, VALAVANIS A, KEELEY J, et al. Coherent three-dimensional terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(18):181112. DOI:10.1063/1.4827886.
- [68] VALAVANIS A, DEAN P, LIM Y L, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(1):37–43. DOI:10.1109/JSEN.2012.2218594.
- [69] ZHOU Zhitao, ZHOU Tao, ZHANG Shaoqing, et al. Multicolor T-ray imaging using multispectral metamaterials[J]. *Advanced Science*(Weinheim, Baden-Württemberg, Germany), 2018, 5(7):1700982. DOI:10.1002/advs.201700982.
- [70] DESTIC F, PETITJEAN Y, MASSENOT S, et al. THz QCL-based active imaging applied to composite materials diagnostic[C]// *The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Rome, Italy: IEEE, 2010: 1–2. DOI: 10.1109/ICIMW.2010.5612792.
- [71] BROWN E R, SOLLNER T C L G, PARKER C D, et al. Oscillations up to 420 GHz in GaAs/AlAs resonant tunneling diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 55(17):1777–1779. DOI:10.1063/1.102190.
- [72] BROWN E R, SÖDERSTRÖM J R, PARKER C D, et al. Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(20):2291–2293. DOI:10.1063/1.104902.
- [73] RODWELL M J W, ALLEN S T, YU R Y, et al. Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(7):1037–1059. DOI:10.1109/5.293161.
- [74] SUZUKI S, ASADA M, TERANISHI A, et al. Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(24):242102. DOI:10.1063/1.3525834.
- [75] FEIGINOV M, SYDLO C, COJOCARI O, et al. Resonant-tunnelling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(23):233506. DOI:10.1063/1.3667191.
- [76] FEIGINOV M N. Displacement currents and the real part of high-frequency conductance of the resonant-tunneling diode[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(21):3301–3303. DOI:10.1063/1.1372357.
- [77] IZUMI R, SUZUKI S, ASADA M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode[C]// *2017 the 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz)*. Cancun, Mexico: IEEE, 2017: 1–2. DOI:10.1109/IRMMW-THz.2017.8066877.
- [78] MAEKAWA T, KANAYA H, SUZUKI S, et al. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(2):024101. DOI:10.7567/APEX.9.024101.
- [79] MIYAMOTO T, YAMAGUCHI A, MUKAI T. Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(3):032201. DOI:10.7567/JJAP.55.032201.
- [80] LI Y, KANAME R, NISHIDA Y, et al. Imaging applications with a single resonant tunneling diode transceiver in 300 GHz band[C]// *2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics(MWP)*. Matsue, Japan: IEEE, 2020: 120–123. DOI: 10.23919/MWP48676.2020.9314482.
- [81] BROWN E R, MCINTOSH K A, NICHOLS K B, et al. Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(3):285–287. DOI:10.1063/1.113519.
- [82] SONG H J, SHIMIZU N, FURUTA T, et al. Broadband-frequency-tunable sub-terahertz wave generation using an optical comb, AWGs, optical switches, and a uni-traveling carrier photodiode for spectroscopic applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15):2521–2530. DOI:10.1109/JLT.2008.927170.
- [83] ROUVALIS E, RENAUD C C, MOODIE D G, et al. Traveling-wave uni-traveling carrier photodiodes for continuous wave THz generation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11):11105–11110. DOI:10.1364/OE.18.011105.
- [84] PREU S, RENNER F H, MALZER S, et al. Efficient terahertz emission from ballistic transport enhanced n-p-n superlattice photomixers[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(21):212125. DOI:10.1063/1.2743400.

- [85] ITO H, NAKAJIMA F, FURUTA T, et al. Continuous THz-wave generation using antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiodes[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005,20(7):S191. DOI:10.1088/0268-1242/20/7/008.
- [86] NELLEN S, ISHIBASHI T, DENINGER A, et al. Experimental comparison of UTC-and pin-photodiodes for continuous-wave terahertz generation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2020,41(4):343-354. DOI:10.1007/s10762-019-00638-5.
- [87] DING Yujie. Progress in terahertz sources based on difference-frequency generation[Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014,31(11):2696-2711. DOI:10.1364/JOSAB.31.002696.
- [88] SAFIAN R, GHAZI G, MOHAMMADIAN N. Review of photomixing continuous-wave terahertz systems and current application trends in terahertz domain[J]. *Optical Engineering*, 2019,58(11):110901. DOI:10.1117/1.OE.58.11.110901.
- [89] VERGHESE S, MCINTOSH K A, CALAWA S, et al. Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers[J]. *Applied Physics Letters*, 1998,73(26):3824-3826. DOI:10.1063/1.122906.
- [90] MATSUURA S, BLAKE G A, WYSS R A, et al. A traveling-wave THz photomixer based on angle-tuned phase matching[J]. *Applied Physics Letters*, 1999,74(19):2872-2874. DOI:10.1063/1.124042.
- [91] YAHYAPOUR M, VIEWEG N, ROGGENBUCK A, et al. A flexible phase-insensitive system for broadband CW-terahertz spectroscopy and imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016,6(5):670-673. DOI:10.1109/TTHZ.2016.2589540.
- [92] SIEBERT K J, QUAST H, LEONHARDT R, et al. Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2002,80(16):3003-3005. DOI:10.1063/1.1469679.
- [93] KIM J Y, SONG H J, AJITO K, et al. Continuous-wave THz homodyne spectroscopy and imaging system with electro-optical phase modulation for high dynamic range[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013,3(2):158-164. DOI:10.1109/TTHZ.2012.2228896.
- [94] MOON K, KIM N, SHIN J H, et al. Continuous-wave terahertz system based on a dual-mode laser for real-time non-contact measurement of thickness and conductivity[J]. *Optics Express*, 2014,22(3):2259-2266. DOI:10.1364/OE.22.002259.
- [95] SONG H, HWANG S, AN H, et al. Continuous-wave THz vector imaging system utilizing two-tone signal generation and self-mixing detection[J]. *Optics Express*, 2017,25(17):20718-20726. DOI:10.1364/OE.25.020718.
- [96] DÜLME S, STEEG M, MOHAMMAD I, et al. Ultra-low phase-noise photonic terahertz imaging system based on two-tone square-law detection[J]. *Optics Express*, 2020,28(20):29631-29643. DOI:10.1364/OE.400405.
- [97] YANG Zuomin, ZHANG Lu, LU Zijie, et al. Robust photonic terahertz vector imaging scheme using an optical frequency comb[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022,40(9):2717-2723. DOI:10.1109/JLT.2022.3146438.
- [98] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R B, et al. Optoelectronic frequency-modulated continuous-wave terahertz spectroscopy with 4 THz bandwidth[J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):1071. DOI:10.1038/s41467-021-21260-x.
- [99] KUTZ J, LIEBERMEISTER L, VIEWEG N, et al. A terahertz fast-sweep optoelectronic frequency-domain spectrometer: calibration, performance tests, and comparison with TDS and FDS[J]. *Applied Sciences*, 2022,12(16):8257. DOI:10.3390/app12168257.
- [100] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R B, et al. Terahertz multilayer thickness measurements: comparison of optoelectronic time and frequency domain systems[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2021,42(11):1153-1167. DOI:10.1007/s10762-021-00831-5.
- [101] HUNSCHE S, KOCH M, BRENER I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998,150(1-6):22-26. DOI:10.1016/S0030-4018(98)00044-3.
- [102] MITROFANOV O, BRENER I, HAREL R, et al. Terahertz near-field microscopy based on a collection mode detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2000,77(22):3496-3498. DOI:10.1063/1.1328772.
- [103] KAWANO Y, ISHIBASHI K. An on-chip near-field terahertz probe and detector[J]. *Nature Photonics*, 2008,2(10):618-621. DOI:10.1038/nphoton.2008.157.
- [104] MACFADEN A J, RENO J L, BRENER I, et al. 3 μm aperture probes for near-field terahertz transmission microscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,104(1):011110. DOI:10.1063/1.4861621.
- [105] 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. DOI:10.1364/OL.25.001122.
- [106] WANG Xinke, YE Jiasheng, SUN Wenfeng, et al. Terahertz near-field microscopy based on an air-plasma dynamic aperture[J]. *Light, Science & Applications*, 2022,11(1):129. DOI:10.1038/s41377-022-00822-8.
- [107] VAN D V N C J, PLANKEN P C M. Electro-optic detection of subwavelength terahertz spot sizes in the near field of a metal

- tip[J]. *Applied Physics Letters*, 2002,81(9):1558–1560. DOI:10.1063/1.1503404.
- [108] CHEN Houtong, KERSTING R, CHO G C. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(15):3009–3011. DOI:10.1063/1.1616668.
- [109] COCKER T L, JELIC V, GUPTA M, et al. An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope[J]. *Nature Photonics*, 2013,7(8): 620–625. DOI:10.1038/nphoton.2013.151.
- [110] YOSHIDA S, ARASHIDA Y, HIRORI H, et al. Terahertz scanning tunneling microscopy for visualizing ultrafast electron motion in nanoscale potential variations[J]. *ACS Photonics*, 2021,8(1):315–323. DOI:10.1021/acsp Photonics.0c01572.
- [111] HUBER A J, KEILMANN F, WITTBORN J, et al. Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices[J]. *Nano Letters*, 2008,8(11):3766–3770. DOI:10.1021/nl802086x.
- [112] 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. DOI:10.1021/nl503998v.
- [113] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000,85(18):3966–3969. DOI:10.1103/PhysRevLett.85.3966.
- [114] GRBIC A, ELEFTHERIADES G V. Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens[J]. *Physical Review Letters*, 2004,92(11):117403. DOI:10.1103/PhysRevLett.92.117403.
- [115] BELOV P A, SIMOVSKI C R, IKONEN P. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals[J]. *Physical Review B, Condensed Matter and Materials Physics*, 2005,71(19):193105. DOI:10.1103/PhysRevB.71.193105.
- [116] JUNG J, GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L, et al. Holey metal films make perfect endoscopes[J]. *Physical Review B, Condensed Matter and Materials Physics*, 2009,79(15):153407. DOI:10.1103/PhysRevB.79.153407.
- [117] HUANG Tiejun, TANG Henghe, TAN Yunhua, et al. Terahertz super-resolution imaging based on subwavelength metallic grating[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019,67(5):3358–3365. DOI:10.1109/TAP.2019.2894260.
- [118] TUNIZ A, KALTENECKER K J, FISCHER B M, et al. Metamaterial fibres for subdiffraction imaging and focusing at terahertz frequencies over optically long distances[J]. *Nature Communications*, 2013,4(1):2706. DOI:10.1038/ncomms3706.
- [119] ANDRYIEUSKI A, LAVRINENKO A V, CHIGRIN D N. Graphene hyperlens for terahertz radiation[J]. *Physical Review B, Condensed Matter and Materials Physics*, 2012,86(12):121108. DOI:10.1103/PhysRevB.86.121108.
- [120] TANG Henghe, LIU Pukun. Long-distance super-resolution imaging assisted by enhanced spatial Fourier transform[J]. *Optics Express*, 2015,23(18):23613–23623. DOI:10.1364/OE.23.023613.
- [121] TANG Henghe, HUANG Tiejun, LIU Jiangyu, et al. Tunable terahertz deep subwavelength imaging based on a graphene monolayer[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):46283. DOI:10.1038/srep46283.
- [122] JIANG Xue, CHEN Hao, LI Zeyu, et al. All-dielectric metalens for terahertz wave imaging[J]. *Optics Express*, 2018,26(11): 14132–14142. DOI:10.1364/OE.26.014132.
- [123] LI Xurong, LI Jiangxi, LI Yuhang, et al. High-throughput terahertz imaging: progress and challenges[J]. *Light, Science & Applications*, 2023,12(1):233. DOI:10.1038/s41377-023-01278-0.
- [124] LEE A W M, HU Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Optics Letters*, 2005,30(19):2563–2565. DOI:10.1364/OL.30.002563.
- [125] 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/spl times/240 microbolometer focal-plane array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006,18(13):1415–1417. DOI:10.1109/LPT.2006.877220.
- [126] 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. DOI:10.1364/OL.33.000440.
- [127] DEM'YANENKO M A, ESAEV D G, KNYAZEV B A, et al. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2008,92(13):131116. DOI:10.1063/1.2898138.
- [128] ODA N, KURASHINA S, MIYOSHI M, et al. Microbolometer terahertz focal plane array and camera with improved sensitivity in the sub-terahertz region[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2015,36(10):947–960. DOI:10.1007/s10762-015-0184-2.
- [129] NEMOTO N, KANDA N, IMAI R, et al. High-sensitivity and broadband, real-time terahertz camera incorporating a microbolometer array with resonant cavity structure[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016,6(2):175–182. DOI:10.1109/TTHZ.2015.2508010.
- [130] LUOMAHARA J, SIPOLA H, GRÖNBERG L, et al. A passive, fully staring THz video camera based on kinetic inductance bolometer arrays[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021,11(1):101–108. DOI:10.1109/TTHZ.2020.

- 3029949.
- [131] SEŠEK A, KAŠALYNAS I, ŽEMVA A, et al. Antenna-coupled Ti-microbolometers for high-sensitivity terahertz imaging[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2017(268):133–140. DOI:10.1016/j.sna.2017.11.029.
- [132] BLANCHARD F, NKECK J E, MATTE D, et al. A low-cost terahertz camera[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12):2531. DOI:10.3390/app9122531.
- [133] LEE Y S. Continuous-wave terahertz sources and detectors[M]// LEE Y S. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Boston, MA US:Springer, 2009:1–41. DOI:10.1007/978-0-387-09540-0_4.
- [134] YANG Jun, RUAN Shuangchen, ZHANG Min. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by a pyroelectric camera[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1):29–31.
- [135] LI Qi, DING Shenghui, YAO Rui, et al. Real-time terahertz scanning imaging by use of a pyroelectric array camera and image denoising[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2010, 27(11):2381–2386. DOI:10.1364/JOSAA.27.002381.
- [136] DING Shenghui, LI Qi, LI Yunda, et al. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11):1993–1995. DOI:10.1364/OL.36.001993.
- [137] HUANG H C, QIU P Y, PANEZAI S, et al. Continuous-wave terahertz high-resolution imaging via synthetic hologram extrapolation method using pyroelectric detector[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120:105683. DOI:10.1016/j.optlastec.2019.105683.
- [138] DYAKONOV M, SHUR M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(3):380–387. DOI:10.1109/16.485650.
- [139] KNAP W, DENG Y, RUMYANTSEV S, et al. Resonant detection of sub-terahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(24):4637–4639. DOI:10.1063/1.1525851.
- [140] KNAP W, KACHOROVSKII V, DENG Y, et al. Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(11):9346–9353. DOI:10.1063/1.1468257.
- [141] AL HADI R, SHERRY H, GRZYB J, et al. A 1 k-pixel video camera for 0.7–1.1 terahertz imaging applications in 65 nm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(12):2999–3012. DOI:10.1109/JSSC.2012.2217851.
- [142] YOKOYAMA S, IKEBE M, KANAZAWA Y, et al. 5.8 A 32 × 32-pixel 0.9 THz imager with pixel-parallel 12b VCO-based ADC in 0.18 μm CMOS[C]// 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA:IEEE, 2019:108–110. DOI:10.1109/ISSCC.2019.8662483.
- [143] JAIN R, HILLGER P, GRZYB J, et al. 34.3 A 32 × 32 pixel 0.46–to–0.75 THz light-field camera SoC in 0.13 μm CMOS[C]// 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA:IEEE, 2021:484–486. DOI:10.1109/ISSCC42613.2021.9365832.
- [144] LIU Min, CAI Ziteng, ZHOU Shaohua, et al. A 16.4k pixel 3.08–to–3.86 THz digital real-time CMOS image sensor with 73 dB dynamic range[C]// 2023 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA:IEEE, 2023:4–6. DOI:10.1109/ISSCC42615.2023.10067620.
- [145] ALVES F, KEARNEY B, GRBOVIC D, et al. Strong terahertz absorption using SiO₂/Al based metamaterial structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11):111104. DOI:10.1063/1.3693407.
- [146] KEARNEY B, ALVES F, GRBOVIC D, et al. Al/SiO_x/Al single and multiband metamaterial absorbers for terahertz sensor applications[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(1):013801. DOI:10.1117/1.OE.52.1.013801.
- [147] WITHAYACHUMNANKUL W, SHAH C M, FUMEAUX C, et al. Plasmonic resonance toward terahertz perfect absorbers[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(7):625–630. DOI:10.1021/ph500110t.
- [148] FAN K B, SUEN J Y, LIU X Y, et al. All-dielectric metasurface absorbers for uncooled terahertz imaging[J]. *Optica*, 2017, 4(6):601–604. DOI:10.1364/OPTICA.4.000601.
- [149] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2009, 79(5):053840. DOI:10.1103/PhysRevA.79.053840.
- [150] ZHANG Zibang, MA Xiao, ZHONG Jingang. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015(6):6225. DOI:10.1038/ncomms7225.
- [151] SUN M J, MENG L T, EDGAR M P, et al. A Russian dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):3464. DOI:10.1038/s41598-017-03725-6.
- [152] GEADAH, CORINTHIOS. Natural, dyadic, and sequence order algorithms and processors for the Walsh-Hadamard transform[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, C-26(5):435–442. DOI:10.1109/TC.1977.1674860.

- [153] YU Wenkai. Super sub-Nyquist single-pixel imaging by means of cake-cutting Hadamard basis sort[J]. *Sensors*, 2019,19(19): 4122. DOI:10.3390/s19194122.
- [154] 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. DOI:10.1063/1.2989126.
- [155] SHEN H,GAN L,NEWMAN N,et al. Spinning disk for compressive imaging[J]. *Optics Letters*, 2012,37(1):46–48. DOI:10.1364/OL.37.000046.
- [156] DUAN Pan,WANG Yuye,XU Degang,et al. Single pixel imaging with tunable terahertz parametric oscillator[J]. *Applied Optics*, 2016,55(13):3670–3675. DOI:10.1364/AO.55.003670.
- [157] STANTCHEV R I,SUN B Q,HORNETT S M,et al. Noninvasive,near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016,2(6):e1600190. DOI:10.1126/sciadv.1600190.
- [158] SHREKENHAMER D,WATTS C M,PADILLA W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2013,21(10):12507–12518. DOI:10.1364/OE.21.012507.
- [159] AUGUSTIN S,HIERONYMUS J,JUNG P,et al. Compressed sensing in a fully non-mechanical 350 GHz imaging setting[J]. *Journal of Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves*, 2015,36(5):496–512. DOI:10.1007/s10762-014-0141-5.
- [160] SHANG Yingjie,WANG Xinke,SUN Wenfeng,et al. Terahertz image reconstruction based on compressed sensing and inverse Fresnel diffraction[J]. *Optics Express*, 2019,27(10):14725–14735. DOI:10.1364/OE.27.014725.
- [161] STANTCHEV R I,YU Xiao,BLU T,et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. *Nature Communications*, 2020,11(1):2535. DOI:10.1038/s41467-020-16370-x.
- [162] LI Tianyu,FANG Xing,ZHANG Lu, et al. Photonic continuous-wave single-pixel terahertz imaging based on compressive sensing[C]// 2024 Asia Communications and Photonics Conference(ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications(IPOC). Beijing,China:IEEE, 2024:1–3. DOI:10.1109/ACP/IPOC63121.2024.10810027.
- [163] WATTS C M, SHREKENHAMER D, MONTOYA J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014,8(8):605–609. DOI:10.1038/nphoton.2014.139.
- [164] LI Weili,HU Xuemei,WU Jingbo,et al. Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging[J]. *Light:Science & Applications*, 2022,11(1):191. DOI:10.1038/s41377-022-00879-5.
- [165] SAQUEB S A N, SERTEL K. Phase-sensitive single-pixel THz imaging using intensity-only measurements[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016,6(6):810–816. DOI:10.1109/TTHZ.2016.2610760.
- [166] SHEN Y,GAN L, STRINGER M, et al. Terahertz pulsed spectroscopic imaging using optimized binary masks[J]. *Applied Physics Letters*, 2009,95(23):231112. DOI:10.1063/1.3271030.
- [167] ZANOTTO L,PICCOLI R,DONG J,et al. Time-domain terahertz compressive imaging[J]. *Optics Express*, 2020,28(3):3795–3802. DOI:10.1364/OE.384134.
- [168] STANTCHEV R I,PHILLIPS D B,HOBSON P,et al. Compressed sensing with near-field THz radiation[J]. *Optica*, 2017,4(8): 989–992. DOI:10.1364/OPTICA.4.000989.
- [169] CHEN Sichao,DU Lianghui,MENG Kun,et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2019,44(1):21–24. DOI:10.1364/OL.44.000021.
- [170] HORNETT S M,STANTCHEV R I,VARDAKI M Z,et al. Subwavelength terahertz imaging of graphene photoconductivity[J]. *Nano Letters*, 2016,16(11):7019–7024. DOI:10.1021/acs.nanolett.6b03168.
- [171] MOHR T,HERDT A,ELSÄSSER W. 2D tomographic terahertz imaging using a single pixel detector[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3):3353–3367. DOI:10.1364/OE.26.003353.
- [172] SAQUEB S A N, SERTEL K. Multisensor compressive sensing for high frame-rate imaging system in the THz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019,9(5):520–523. DOI:10.1109/TTHZ.2019.2926618.
- [173] KANNEGULLA A,SHAMS M I B,LIU L,et al. Photo-induced spatial modulation of THz waves:opportunities and limitations[J]. *Optics Express*, 2015,23(25):32098–32112. DOI:10.1364/OE.23.032098.
- [174] ZANOTTO L,PICCOLI R,DONG Junliang,et al. Single-pixel terahertz imaging:a review[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(9):09200012. DOI:10.29026/oea.2020.200012.
- [175] 赵梓栋,杨照华,余远金. 单像素成像技术研究进展[J]. *中国激光*, 2022,49(19):330–339. (ZHAO Zidong,YANG Zhaohua,YU Yuanjin. Research progress of single pixel imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 330–339.) DOI: 10.3788/CJL202249.1917001.
- [176] LYU Meng,WANG Wei,WANG Hao,et al. Deep-learning-based ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):17865. DOI: 10.1038/s41598-017-18171-7.

- [177] SHIMOBABA T, ENDO Y, NISHITSUJI T, et al. Computational ghost imaging using deep learning[J]. *Optics Communications*, 2018(413):147–151. DOI:10.1016/j.optcom.2017.12.041.
- [178] MITTLEMAN D M, HUNSCHE S, BOIVIN L, et al. T-ray tomography[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12):904–906. DOI:10.1364/OL.22.000904.
- [179] ZEITLER J A, TADAY P F, NEWNHAM D A, et al. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting: a review[J]. *The Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2007, 59(2):209–223. DOI:10.1211/jpp.59.2.0008.
- [180] FITZGERALD A J, COLE B E, TADAY P F. Nondestructive analysis of tablet coating thicknesses using terahertz pulsed imaging[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2005, 94(1):177–183. DOI:10.1002/jps.20225.
- [181] SHEN Yaochun. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: a review[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2011, 417(1/2):48–60. DOI:10.1016/j.ijpharm.2011.01.012.
- [182] HAASER M, GORDON K C, STRACHAN C J, et al. Terahertz pulsed imaging as an advanced characterisation tool for film coatings: a review[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2013, 457(2):510–520. DOI:10.1016/j.ijpharm.2013.03.053.
- [183] HO L, MÜLLER R, RÖMER M, et al. Analysis of sustained-release tablet film coats using terahertz pulsed imaging[J]. *Journal of Controlled Release*, 2007, 119(3):253–261. DOI:10.1016/j.jconrel.2007.03.011.
- [184] MAY R K, EVANS M J, ZHONG S C, et al. Terahertz in-line sensor for direct coating thickness measurement of individual tablets during film coating in real-time[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2011, 100(4):1535–1544. DOI:10.1002/jps.22359.
- [185] FUKUNAGA K, PICOLLO M. Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials[J]. *Applied Physics A*, 2010, 100(3):591–597. DOI:10.1007/s00339-010-5643-y.
- [186] ABRAHAM E, FUKUNAGA K. Terahertz imaging applied to the examination of artistic objects[J]. *Studies in Conservation*, 2015, 60(6):343–352. DOI:10.1179/2047058414Y.0000000146.
- [187] SECO-MARTORELL C, LÓPEZ-DOMÍNGUEZ V, ARAUZ-GAROFALO G, et al. Goya's artwork imaging with terahertz waves[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15):17800–17805. DOI:10.1364/OE.21.017800.
- [188] ADAM A J L, PLANKEN P C M, MELONI S, et al. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5):3407–3416. DOI:10.1364/OE.17.003407.
- [189] KOCH-DANDOLO C L, FILTENBORG T, FUKUNAGA K, et al. Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16):5123–5129. DOI:10.1364/AO.54.005123.
- [190] SU K, SHEN Y C, ZEITLER J A. Terahertz sensor for non-contact thickness and quality measurement of automobile paints of varying complexity[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(4):432–439. DOI:10.1109/TTHZ.2014.2325393.
- [191] VAN MECHELEN J L M, FRANK A, MAAS D J H C. Thickness sensor for drying paints using THz spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5):7514–7525. DOI:10.1364/OE.418809.
- [192] FERGUSON B, WANG S H, GRAY D, et al. T-ray computed tomography[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15):1312–1314. DOI:10.1364/OL.27.001312.
- [193] BRAHM A, KUNZ M, RIEHEMANN S, et al. Volumetric spectral analysis of materials using terahertz-tomography techniques[J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(1):151–158. DOI:10.1007/s00340-010-3945-6.
- [194] BRAHM A, TYMOSHCHUK M, WICHMANN F, et al. Wavelet based identification of substances in terahertz tomography measurements[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, 35(11):974–986. DOI:10.1007/s10762-014-0106-8.
- [195] RECUR B, GUILLET J P, MANEK-HÖNNINGER I, et al. Propagation beam consideration for 3D THz computed tomography[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6):5817–5829. DOI:10.1364/OE.20.005817.
- [196] RECUR B, BALACEY H, SLEIMAN J B, et al. Ordered subsets convex algorithm for 3D terahertz transmission tomography[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19):23299–23309. DOI:10.1364/OE.22.023299.
- [197] BITMAN A, GOLDRING S, MOSHE I, et al. Computed tomography using broadband Bessel THz beams and phase contrast[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7):1925–1928. DOI:10.1364/OL.39.001925.
- [198] WANG Dayong, LI Bin, RONG Lu, et al. Extended depth of field in continuous-wave terahertz computed tomography based on Bessel beam[J]. *Optics Communications*, 2019(432):20–26. DOI:10.1016/j.optcom.2018.09.031.
- [199] SHEN Sishi, HAO Congjing, LIANG Bin, et al. Terahertz fan-beam computed tomography[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(9):2481–2484. DOI:10.1364/OL.523116.
- [200] CHEN Linyu, WANG Yuye, XU Degang, et al. Terahertz computed tomography of high-refractive-index objects based on

- refractive index matching[J]. IEEE Photonics Journal, 2018,10(6):1–13. DOI:10.1109/JPHOT.2018.2877657.
- [201] FOSODEDER P, HUBMER S, PLOIER A, et al. Phase-contrast THz-CT for non-destructive testing[J]. Optics Express, 2021, 29(10):15711–15723. DOI:10.1364/OE.422961.
- [202] FOSODEDER P, VAN FRANK S, RANKL C. Highly accurate THz-CT including refraction effects[J]. Optics Express, 2022, 30(3):3684–3699. DOI:10.1364/OE.444151.
- [203] DUHANT A, TRIKI M, STRAUSS O. Terahertz differential computed tomography: a relevant nondestructive inspection application[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2019,40(2):178–199. DOI:10.1007/s10762-018-0564-5.
- [204] WANG Dayong, NING Ran, LI Gaochao, et al. 3D image reconstruction of terahertz computed tomography at sparse angles by total variation minimization[J]. Applied Optics, 2022,61(5):B1–B7. DOI:10.1364/AO.440847.
- [205] 韩智超, 韩一平. 太赫兹波光声效应诊断皮肤癌仿真分析(特邀)[J]. 光子学报, 2022,51(10):429–438. (HAN Zhichao, HAN Yiping. Simulation analysis of skin cancer diagnosis using terahertz-waves photoacoustic effect: invited[J]. Acta Photonica Sinica, 2022,51(10):429–438. DOI:10.3788/gzxb20225110.1017002.
- [206] LI Nan, ZHENG Shilie, HE Tong, et al. Metasurface-based dual-mode bright-field and spiral phase contrast THz imaging with enhanced focal depth[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024,43(9):1–9. DOI:10.1109/JLT.2024.3521973.

作者简介:

李天宇(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹单像素成像. email:lity11@zju.edu.cn.

方兴(2000–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像.

杨作民(1997–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹感知.

张鹿(1993–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹光子学、光通信.

余显斌(1976–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为超快光子射频信号处理、超高速毫米波、太赫兹无线通信、毫米波、太赫兹成像.