

# 太赫兹成像技术研究进展及应用

周强国<sup>1,2</sup>, 黄志明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 太赫兹波 (terahertz waves) 位于红外波段与微波波段之间, 相比其他波段具有高透射性、低能量性、相干性、指纹光谱以及瞬态性等特点。随着太赫兹成像技术在空间通信、雷达探测、航空航天以及生物医疗等领域的广泛应用, 已经表现出传统成像技术 (如可见光、超声波和 X 射线成像) 无法比拟的优势。本文首先对太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 成像技术以及室温 (非制冷) 微测辐射热计太赫兹成像技术的发展现状进行介绍, 再介绍太赫兹成像技术的典型应用, 最后指出太赫兹成像技术在发展中存在的限制因素并给出合理的建议。

**关键词:** 太赫兹; 时域光谱; 微测辐射热计; 成像技术

中图分类号: O441.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)04-0328-15

## Review of Research and Application of Terahertz Imaging Technology

ZHOU Qiangguo<sup>1,2</sup>, HUANG Zhiming<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) waves are located between the infrared and microwave bands. Compared with other bands, they have the characteristics of high transmission, low energy, coherence and transient nature. With the widespread application of terahertz imaging technology in the fields of space communication, radar detection, aerospace and biomedicine, it has been shown that THz imaging offers advantages over traditional imaging technologies (such as ultrasonic imaging and X-ray imaging). This paper first introduces the development status of THz time-domain spectroscopy (THz-TDS) imaging technology and room temperature (uncooled) microbolometer THz imaging technology. Subsequently, typical applications of THz imaging technology are presented. Finally, the limiting factors of THz imaging technology are discussed.

**Key words:** terahertz, time-domain spectroscopy, microbolometer, imaging technology

## 0 引言

太赫兹波指频率在 0.1~10 THz (1 THz =  $10^{12}$  Hz) 范围内的电磁波。太赫兹技术是研究太赫兹波的产生方式、探测和应用的技术<sup>[1]</sup>。太赫兹成像技术是新兴的前沿交叉科学技术, 涉及物理学、材料学、化学以及工程技术等领域。太赫兹成像技术利用太赫兹脉冲作用于目标物, 不仅可以透过目标成像, 而且可以通过获取目标物反射的太赫兹脉冲强度、相位等信息, 再通过数字信号处理和频谱分析实现太赫兹成像<sup>[2]</sup>。本文对太赫兹时域光谱 (THz-TDS, terahertz time

-domain spectroscopy) 成像技术以及非制冷微测辐射热计太赫兹成像技术的发展现状进行综述, 再介绍太赫兹成像技术在国家安全、安全检查、生物医学以及环境监测等方面的应用, 最后对太赫兹成像技术在发展中存在的影响因素进行分析。

## 1 太赫兹时域光谱成像技术

随着信息技术的快速发展, THz-TDS 成像技术在工程 (如资源勘探和食品加工)、高速通信、天文研究以及生物医疗等领域表现出广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。越来越多的国家和科研单位开始对 THz-TDS 成像技术

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-06-14.

作者简介: 周强国 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外成像及太赫兹探测技术研究。Email: qgzhouhq@163.com.

通信作者: 黄志明 (1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要从事红外与太赫兹相关领域研究。E-mail: zmhuang@mail.sitp.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目 (12134016)、杰出青年基金 (61625505); 中国科学院, 基础前沿科学研究计划 (ZDBS-LY-JSC025)。

进行深入的研究,获得了高信噪比、高分辨率的图像,满足了不同领域的应用需求。

### 1.1 太赫兹脉冲扫描成像

太赫兹脉冲扫描成像利用太赫兹脉冲信号对放在二维扫描平移台上的目标物进行逐点扫描。目标物在垂直于太赫兹波传输方向的  $X$ - $Y$  平面上移动,脉冲信号通过目标物的不同位置,记录不同位置的透射信息或反射信息,获取每个像素点的时域波形,通过傅里叶变换技术提取频谱中包含的相位和振幅等信息,经频谱分析构建目标物的图像。太赫兹脉冲成像具有信噪比较高的优点,其分辨率可以达到亚毫米级<sup>[4]</sup>。最早 AT&T、美国贝尔实验室 (Bell Laboratory) 和 IBM 公司通过光电导<sup>[5-6]</sup>或光整流<sup>[7-9]</sup>的方法获得宽频太赫兹脉冲。随着科技的进步,使用聚焦的飞秒激光将焦点位置处的空气产生电离,形成空气等离子体,利用其中的光学非线性效应也能够产生太赫兹脉冲<sup>[10-12]</sup>。图 1(a)为光电导法产生 THz 波, (b)为光整流效应产生 THz 波, (c)为空气等离子体效应产生太赫兹辐射。

1995 年, B. Hu 等人<sup>[13-14]</sup>使用 800 nm 的脉冲激光对树叶进行了逐点扫描成像,通过语音识别算法提取样品的相位和振幅信息。该系统的具体光路图见图 2,

实验结果如图 3 所示,图像中颜色深浅反映了含水量状况,颜色越深表明含水量越多。由于该系统没有采用锁相放大器 (lock-in amplifier, LIA), 所以信噪比偏低。为了改善信噪比状况,在 1997-2001 年, T. Dorney 等人<sup>[15]</sup>研制了反射式太赫兹成像系统,通过具有位相转换的干涉仪装置有效抑制了背景噪声,极大提高了信噪比和深度分辨率。实验结果显示,该系统分辨能力可达到分辨相干长度的 2%。2008 年, D. Banerjee 等人利用太赫兹脉冲扫描成像对纸张中的含水量进行检测。由于太赫兹辐射对纸张中水分细微变化比较敏感,对纤维的散射并不敏感,利用此特性可以达到较高的测量精度<sup>[16]</sup>。1996 年,美国伦斯勒大学 Zhang 等人<sup>[17]</sup>研制了脉冲式焦平面成像系统,提高了太赫兹成像的信噪比,拓展了太赫兹成像的应用范围。之后, Zhang 等人又通过动态相减技术,使用斩波器对信号的输出频率进行调制,并结合 CCD 同步控制,有效减少了背景噪声的影响,提升了脉冲焦平面成像在实际应用中的价值<sup>[18]</sup>。2006 年, Zhong 等人<sup>[19]</sup>通过反射式太赫兹脉冲焦平面成像系统对多种化学物质进行光谱检测。该系统采用反射测量模式,提高了成像系统的实用性能。

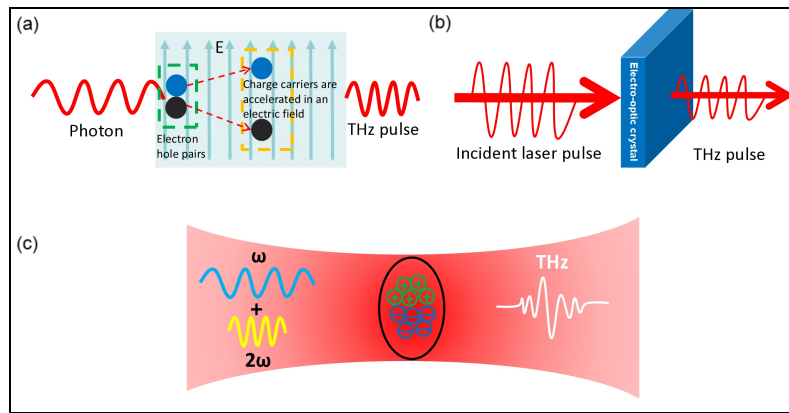


图 1 太赫兹辐射产生方法 (a) 光电导效应; (b)光整流效应; (c)空气等离子体效应

Fig.1 (a) Photo conductance effect; (b) Optical rectification effect; (c) Air plasma effect

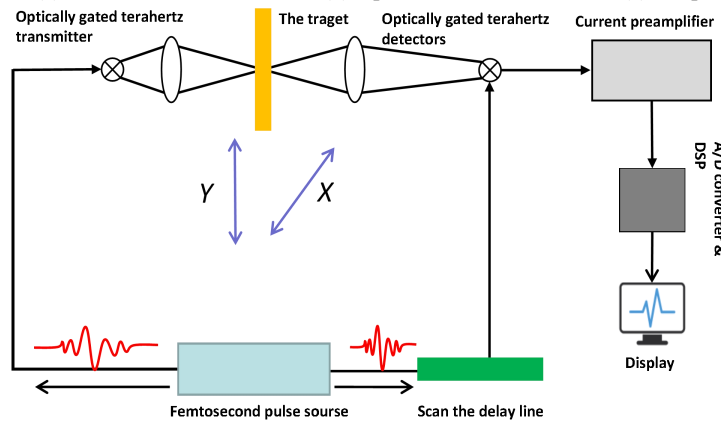


图 2 透射型太赫兹成像系统原理图<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of transmission THz imaging system<sup>[13]</sup>

由于太赫兹脉冲成像存在一定耗时的问題，时间过长对成像质量会产生较大影响。日本大阪大学 Yasui 等人<sup>[20]</sup>对太赫兹成像系统进行了改进，研发了脉冲焦线成像系统。其光路原理图见图 4(a)，太赫兹波通过柱透镜 (CL1) 汇聚成一条焦线照射在样品上，通过样品后的太赫兹焦线又经过一个球透镜 (L2) 和另一个柱透镜 (CL2) 被准直为平行光。在探测光路中，探测光首先经过扩束，并与太赫兹光束形成非共线重合。不同重合区域对应着不同的时间延迟。在重合区域，探测光和探测晶体保持相对垂直，由探测晶体对太赫兹信号进行光电采样。因此利用此成像技术不需要对太赫兹信号进行时域扫描，能够直接从 CMOS 相机获取的图像中提取出太赫兹时域信号，很大程度上缩短实验耗时。Yasui 等人<sup>[20]</sup>利用此系统对一个金属孔阵列样品进行了成像测试。样品分为 4 个区域，孔阵列尺寸在每个区域中是不同的，样品以 1 mm/s 的移

动速度横向通过太赫兹焦线。图 4(b)为样品在 0.204 THz、0.407 THz、0.815 THz、1.600 THz 处的太赫兹图像。此外，由于使用 CMOS 相机采集太赫兹图像，不能进行到锁相滤波导致太赫兹信号的信噪比偏低。2010 年，Schirmer 等人使用太赫兹脉冲焦线成像技术对牙齿等组织进行了检测，实验证明此系统在生物检测中具有良好的效果<sup>[21]</sup>。2011 年，Blanchard 等人将太赫兹脉冲焦平面成像的图像分辨率提升到 14 μm，达到了相应太赫兹波长 (430 μm, 0.7 THz) 的 1/30，实现了太赫兹近场显微<sup>[22]</sup>。该此系统采用了准近场探测和差分电光探测的测量方式，特别之处在于所使用的探测晶体为 20 μm 厚的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体。LiNbO<sub>3</sub> 具有较强的电光系数，对太赫兹脉冲信号可以产生敏感的反应。此工作表明了脉冲焦平面成像系统能够对微米尺寸的样品进行检测，极大拓展了太赫兹成像技术的应用领域<sup>[14]</sup>。

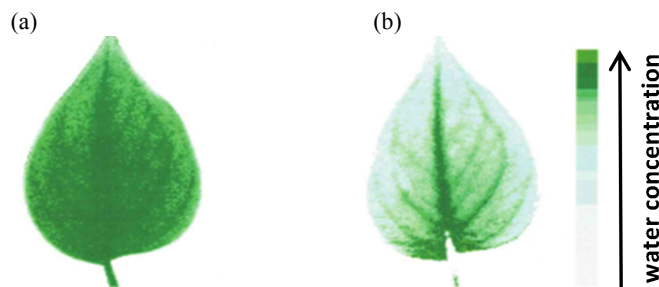


图 3 利用透射型太赫兹成像系统对树叶进行扫描成像：(a) 新鲜树叶成像；(b) 48 h 后的树叶成像<sup>[13]</sup>

Fig.3 The leaves were scanned and imaged using a transmissive THz imaging system: (a) Fresh leaves; (b) Leaves after 48 hours<sup>[13]</sup>

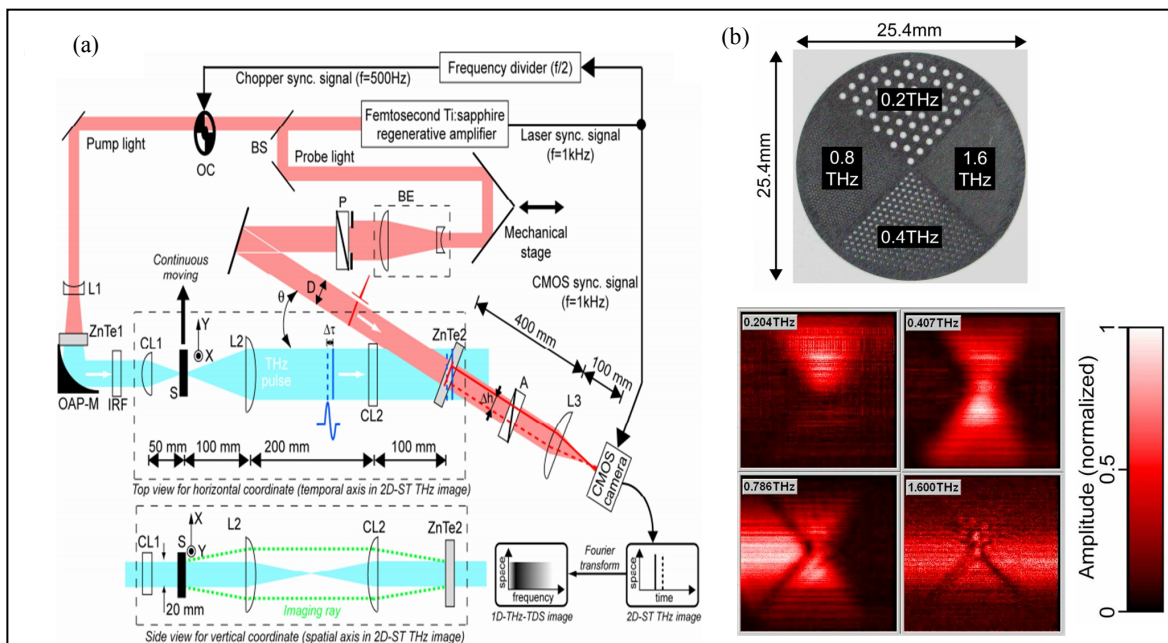


图 4 太赫兹成像系统及样品的太赫兹图像：(a) 太赫兹脉冲焦线成像系统；(b) 金属孔阵列样品以及其在 0.204 THz、0.407 THz、0.815 THz、1.600 THz 处的太赫兹图像<sup>[20]</sup>

Fig.4 Terahertz imaging system and terahertz images of samples: (a) THz pulse focal imaging system; (b) THz images of metal hole array samples and samples at 0.204 THz, 0.407 THz, 0.815 THz, 1.600 THz<sup>[20]</sup>

### 1.2 太赫兹实时成像

太赫兹实时焦平面成像系统属于反射式太赫兹成像系统,该系统不需要对待测物体进行二维扫描就可以获得整个待测物体的光谱信息,可以减少太赫兹逐点成像时间过长带来的不利影响。图5为Zhang和Nick等人<sup>[23]</sup>研制的基于电光材料的太赫兹实时焦平面成像系统。电光晶体取样测量技术可以直接观测到太赫兹电场的二维强度分布,不需要光热效应以及光子效应,系统响应时间虽然较短,但电光晶体的缺陷会影响成像质量。

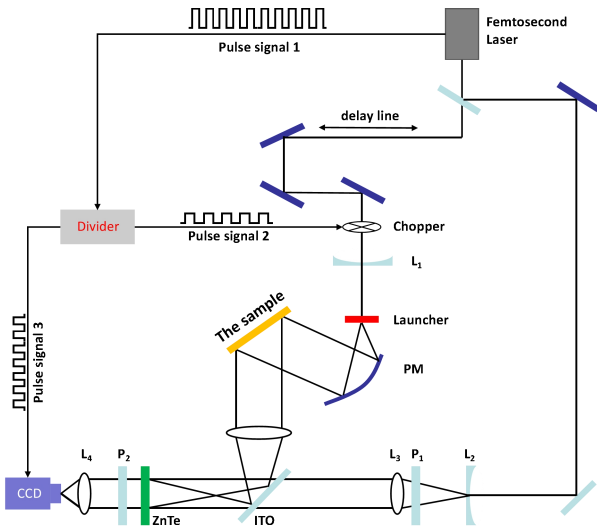


图5 太赫兹实时焦平面成像系统<sup>[23]</sup>

Fig. 5 THz real-time focal plane imaging system<sup>[23]</sup>

Zhang 等人为检测哥伦比亚号航天飞机失事的原因,建成了第一套小型化、便携式太赫兹连续波成像系统,与扫描成像相比,该系统可以提升信息的提取速度<sup>[24]</sup>。实验表明太赫兹成像技术在无损检测方面表现出优异的性能,是X射线以及超声波等无法比拟的。为了进一步消除光电探测晶体材料本身缺陷对成像带来的影响,提高太赫兹实时成像性能,2007年Hattori等人通过采用一种数据处理方法将太赫兹实时成像中探测晶体自身不均匀的光学性质以及光波散射所造成的图像畸变分别提取出来,并对产生这些影响的因素进行消除,可以进一步优化太赫兹实时成像的质量<sup>[25]</sup>。之后,Yasuda等人<sup>[26]</sup>通过使用太赫兹实时成像技术对水管中的水滴和塑料袋中的小铁钉进行成像,结合CMOS摄像头能够清晰地观测物体的移动过程。此外为了研究太赫兹脉冲在晶体中的衍射过程,Nelson等人设计了一种新型的太赫兹实时成像系统,通过把待测物体置于LiNbO<sub>3</sub>晶体里,通过飞秒激光的基频光以及倍频光一起辐射LiNbO<sub>3</sub>晶体,利用基频光产生太赫兹脉冲,倍频光用于探测太赫兹脉冲,观察到了太赫兹脉冲在LiNbO<sub>3</sub>晶体中的衍射过程<sup>[27]</sup>。

2009年英国的Thru Vision公司研制了多通道外差接收阵列的无源焦平面成像系统,使成像距离大于20 m,帧速高于10 Hz,可用于车载成像,是首次投入安检使用的太赫兹无源检测系统<sup>[28]</sup>。2013年,Han等人<sup>[29]</sup>报道了基于InGaAs的肖特基二极管(Schottky barrier diode, SBD)阵列探测器,可用于太赫兹实时成像,其平均响应率为98.5 V/W, NEP $\approx 10^{-10}$  W/Hz<sup>1/2</sup>。

对于国内,深圳大学Y. Jun等人通过热释电焦平面阵列PY-III型,首次开展了1.89 THz的成像研究<sup>[30]</sup>。此后,哈尔滨工业大学通过热释电焦平面阵列PY-III型和SIFIR50 CO<sub>2</sub>气体太赫兹激光器结合,研制了太赫兹实时成像系统,分别在1.63 THz、2.45 THz和2.52 THz频率下进行太赫兹成像,透射成像分辨率达到0.6 mm<sup>[31-33]</sup>。此系统具有功耗小、成本低、成像质量好等特点,但检测灵敏度偏低,需要使用斩波器作为辅助。

### 1.3 太赫兹近场成像

由于太赫兹波属于远红外辐射,通过瑞利判据可以知道,太赫兹成像受到波长对应的衍射极限制,分辨率比可见光要低,无法满足高精度测量要求。对于传统的太赫兹逐点成像系统和实时成像系统,成像分辨率一般在亚毫米量级,限制了太赫兹成像技术的实用性以及太赫兹成像系统的分辨率,所以突破衍射极限是非常有必要的。为此提出了太赫兹近场成像技术,该技术极大提高了太赫兹成像的性能,图6为太赫兹脉冲近场扫描成像系统<sup>[34]</sup>。通常所说的太赫兹近场成像技术是指太赫兹扫描近场光学显微(THz scanning near field optical microscopy, THz-SNOM)技术。

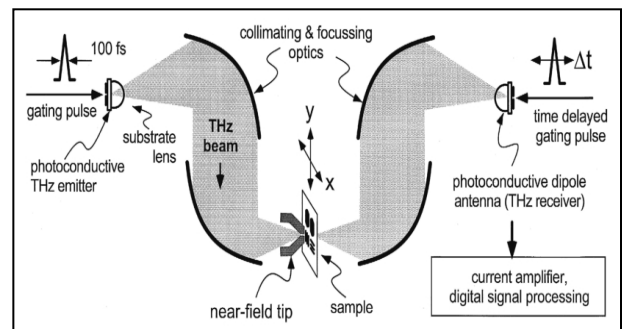


图6 太赫兹脉冲近场扫描成像系统<sup>[34]</sup>

Fig. 6 THz pulse near-field scan imaging system<sup>[34]</sup>

太赫兹近场成像技术的发展主要有以下几种:基于散射式的THz-SNOMs、孔径的THz-SNOMs以及基于时域光谱的THz-SNOMs。本部分内容主要对散射式的THz-SNOMs技术研究进行综述。

Huber等人<sup>[35]</sup>使用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)研究了远场探测背向散射信号的

THz-SNOMs 技术。使用太赫兹激光器对半导体晶体管在 2.52 THz 进行近场显微成像, 得到空间分辨率约 40 nm 的图像。2012 年, Moon 等人<sup>[36]</sup>通过光电导天线作为太赫兹源, 研制了散射式 THz-SNOMs 系统, 成功获取近场信号。经过对 Si 衬底上的金属薄片进行扫描成像, 获得空间分辨率 200 nm 左右的图像。2016 年, 英国利兹大学 Dean 等人<sup>[37]</sup>使用量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL) 作为激光源, 利用探针技术, 采用自混频方式检测近场散射的信号, 得到空间分辨率为 1 μm 的图像。之后, Kuschewski 等人<sup>[38]</sup>将高功率的自由电子激光器 (Free-electron laser, FEL) 作为辐射源, 对金属纳米颗粒在 1.3~8.5 THz 频段内进行探测识别, 得到空间分辨率为 50 nm 的显微图像。2017 年, 剑桥大学卡文迪许实验室 Degl 等人<sup>[39]</sup>同样采用 QCL 作为辐射源和自混频的方式检测信号, 通过石英叉对金属纳米探针的振动进行控制, 并对等离子体共振天线结构进行散射式近场成像, 空间分辨率达到 78 nm。2018 年, Liewald 等人<sup>[40]</sup>使用频率为 0.5~0.75 THz 的肖特基二极管 (SBD) 作为泵浦源, 研制散射式 THz-SNOMs 系统, 该系统采用外差检测技术, 获得近场信号的相位和振幅。通过对半导体载流子进行表征, 得到空间分辨率大约为 50 nm 的太赫兹近场图像。

上述关于 THz-SNOMs 系统多数采用气体激光器、光电导天线或者 QCL 作为发射源, 并没有达到毫米波段纳米量级分辨率。上海理工大学的游冠军等人<sup>[41]</sup>与 SNOMs 技术开创者 Fritz Keilmann 合作, 开展以 QCL 为光源的太赫兹 SNOMs 技术的研究。于 2016 年, 建成国内首套自主研发的散射式 THz-SNOMs 系统, 该系统采用高阶解调背景压缩技术, 能有效提取散射近场信号, 在获得高空间分辨率的同时仍能保持极高的信噪比。之后, 又通过使用 0.1~0.3 THz 频段的太赫兹倍频模块作为发射源, 研制了空间

分辨率为纳米级的散射式 THz-SNOMs 系统。该系统通过纳米探针将样品表面的倏逝波转为远场辐射波, 再通过探针逐点扫描技术即可获得太赫兹近场图像。经过实验表明散射式 THz-SNOMs 系统分别在 196 GHz 和 276 GHz 的频率下对 Si 衬底的金属膜进行成像, 都获得了空间分辨率小于 60 nm 的图像, 图 7 为散射式 THz-SNOMs 系统实验装置与系统原理图。

#### 1.4 太赫兹共焦扫描成像

太赫兹共焦扫描成像具有太赫兹成像和激光共聚焦扫描成像的优点, 按照成像方式分为反射式和透射式。

2006 年, 德国 Salhi M. A. 等人<sup>[42]</sup>首次实现了半共焦透射式扫描显微镜, 图 8(a) 为半共焦透射式扫描光路图。但在半共焦装置中, 由于样品直接放在了针孔后面, 导致成像尺寸被限制。之后, Salhi M. A. 在半共焦扫描显微成像系统的基础上, 设计了透射式共焦扫描成像系统<sup>[43]</sup>, 通过远红外气体激光器泵浦产生 2.52 THz 的激光, 其空间分辨率可以达到 0.26 μm, 图 8(b) 为透射式共焦扫描成像系统。2009 年, Salhi M. A. 等人<sup>[44-45]</sup>改进半共焦扫描显微成像系统, 将探测针孔的尺寸设计为 0.5 mm, 实验表明加入针孔后空间分辨率得到进一步提升, 使共焦成像分辨率高于普通光学系统。

2008 年, Zinovev N. N. 等人<sup>[46]</sup>研制了透射式太赫兹成像实验装置系统, 通过飞秒激光器激发电导天线产生太赫兹辐射, 样品为镀在 Si 基片上的 Cr 层构成的光栅阵列。通过实验获得样品的太赫兹脉冲波形和频谱, 但针孔的加入并没有改变太赫兹脉冲的频率成分。之后, 韩国的 Lim M. 等人<sup>[47]</sup>提出了太赫兹反射式共焦扫描显微成像系统, 该系统包括太赫兹源、分光片、透镜、探测器以及铜制针孔等。系统中使用的太赫兹波长为 0.3 mm, 3 个透镜分别起到准直、物镜和收集镜的作用, 针孔放置于收集镜的焦平面处, 经

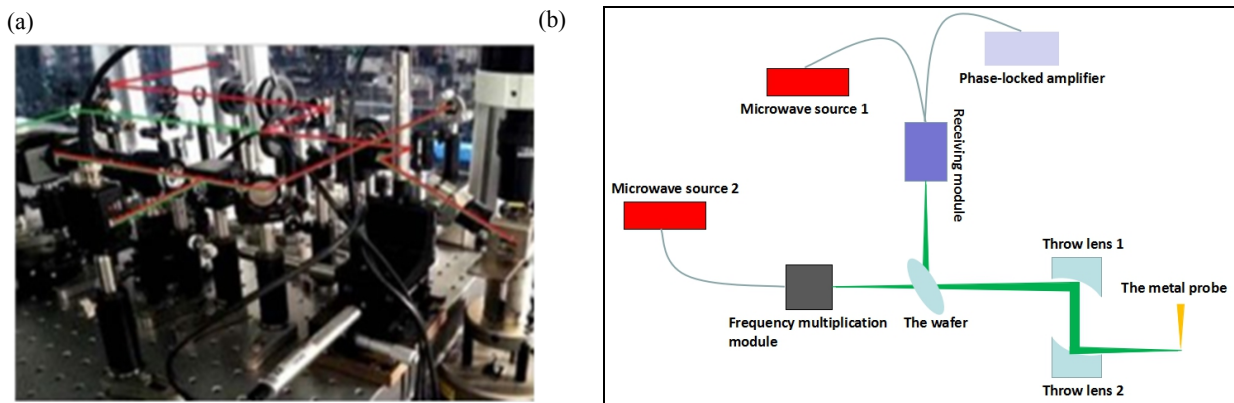


图 7 高空间分辨率的散射式 THz-SNOMs 系统: (a) 实验装置; (b) 系统原理图<sup>[41]</sup>  
Fig.7 Scattering THz-SNOMs system with high spatial resolution: (a) Photos of experimental apparatus and (b) System principle<sup>[41]</sup>

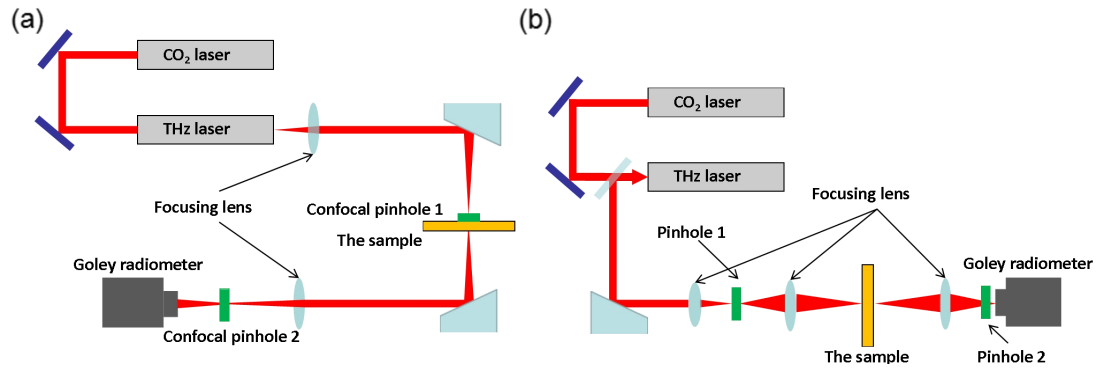


图8 共焦扫描成像系统: (a) 透射式半共焦扫描成像系统; (b) 透射式共焦扫描成像系统<sup>[42-43]</sup>

Fig.8 Confocal scanning imaging system: (a) Transmission type semi-confocal scanning and (b) Confocal scanning imaging system<sup>[42-43]</sup>

过计算成像分辨率可以达到  $40\ \mu\text{m}$ 。为了进一步获取太赫兹辐射信息,2012年,R. U. Siciliani de Cumis 等人研制了 QCL 共焦显微成像系统,该系统使用了能够高度透射太赫兹辐射的透镜,可以更好地准直以及收集太赫兹辐射信息<sup>[48]</sup>。2014年,Hwang 等人<sup>[49]</sup>研发了自由电子激光脉冲的透射式成像实验装置,使太赫兹辐射频率达到  $2.7\ \text{THz}$ ,并对活体鼠皮肤进行观测,发现细胞对于太赫兹辐射具有良好的动态反应。

国内有关太赫兹共焦扫描成像属于起步阶段,相关研究成果较少,目前对此开展研究的单位主要有电子科技大学、首都师范大学和哈尔滨工业大学。

2008年,首都师范大学张艳东等人<sup>[50]</sup>使用相干探测的技术,得到了太赫兹反射式共焦扫描显微成像。该系统利用耿氏振荡器激发产生  $0.2\ \text{THz}$  的辐射,针孔尺寸大小为  $2\ \text{mm}$ ,轴向分辨率为  $25.5\ \text{mm}$ 。由于针孔尺寸较大以及波长较长,成像分辨率偏低。为了解决上述问题,2010年哈尔滨工业大学丁胜晖等人通过 SIFIR-50 的  $\text{CO}_2$  抽运连续太赫兹激光器研制了透射式共焦扫描显微成像系统<sup>[51]</sup>。该探测器为 P4-42 型热释电探测器,光源处的针孔和探测针孔分别为  $1.2\ \text{mm}$ 、 $0.6\ \text{mm}$ 。经过实验证明,所获得图像的横向分辨率得到明显提升,并且对金属片小于  $0.25\ \text{mm}$  的微小区域也能成像。2011年天津大学邸志刚等人研发了连续扫描的太赫兹成像系统<sup>[52]</sup>,太赫兹所采用光源为 FIRL-100,产生  $2.52\ \text{THz}$  的辐射,探测器采用  $\text{LiO}_3\text{Ta}$  的热释电探测器,经实验结果表明该系统的横向分辨率小于  $0.5\ \text{mm}$ ,获得了较高的空间分辨率。

### 1.5 太赫兹三维成像

由于太赫兹三维成像技术可以更好地获取样品内部的信息,目前逐渐成为研究热点。太赫兹三维成像技术主要有太赫兹计算机辅助层析 (computed tomography, CT) 成像、太赫兹衍射层析成像、太赫兹断层成像和太赫兹数字全息等<sup>[53]</sup>。目前太赫兹三维成像技术使用较为成熟的是太赫兹 CT 成像。

评价太赫兹三维成像系统的性能,探测距离是十

分重要的评价指标。2006年,美国喷气推进实验室 (Jet propulsion laboratory, JPL) 研制了具有高分辨测距能力的 THz 雷达成像系统。目标的距离为  $4\ \text{m}$  时,一维测距分辨率达到  $2\ \text{cm}$  左右<sup>[54]</sup>。之后,美国 JPL 实验室在  $662\sim 691\ \text{GHz}$  频段通过调频的方式成功实现了在  $25\ \text{m}$  处的三维成像,其中平面分辨率为  $1\ \text{cm}$ ,深度分辨率为  $7\ \text{mm}$ <sup>[55]</sup>。为进一步提升探测距离,2008年弗劳恩霍夫研究所 (Fraunhofer-Gesellschaft) 通过采用调频连续波 (FMCW) 与逆孔径雷达相结合的技术,在  $0.220\ \text{THz}$ ,成功在  $200\ \text{m}$  距离处实现二维成像,使分辨率达到了  $1.8\ \text{cm}$  左右<sup>[56]</sup>。2009年,美国西北太平洋国家实验室 (pacific northwest national laboratory, PNNL) <sup>[57-59]</sup>,在距离目标物  $5\ \text{m}$  处实现了三维成像,所使用的频率为  $345.2\sim 354.8\ \text{GHz}$ ,分辨率达到了  $1.5\ \text{cm}$ ,对  $3\ \text{m}^2$  的视场范围成像时间为  $10\ \text{s}$ 。

2009年,德国 RPG 公司通过在  $230\sim 320\ \text{GHz}$  频率范围使用 FMCW 技术在  $1.5\ \text{m}$  左右的探测距离实现了三维成像,深度分辨率为  $1.4\ \text{mm}$ ,距离  $0.5\ \text{m}$  处的平面分辨率达到  $4\ \text{mm}$ , $30\ \text{cm}\times 20\ \text{cm}$  的视场范围成像时间约为  $9\ \text{s}$  ( $75\times 50$  像素)<sup>[60-61]</sup>。之后,Brahm A. 等通过 THz-TDS 成像技术对装有葡萄糖和乳糖的聚苯乙烯泡沫进行光谱层析成像,再与数据库进行对比分析,能够识别出葡萄糖以及乳糖在材料中的位置<sup>[62]</sup>。2014年,Brahm A. 等<sup>[63]</sup>利用 THz-TDS 成像技术对不同材料以及形状的样品进行 CT 投影时的光学效应进行了深入的研究,并结合 Zemax 软件对投影图像进行模拟仿真,实验结果显示所得到的折射效应与理论计算有着较好的吻合。

2010年,日本的 Kato E. 等通过超短脉冲光纤激光器激发光电导开关,产生  $3\ \text{THz}$  的脉冲信号,实现光谱三维层析分析<sup>[64]</sup>。该系统的特点在于使用光纤激光器和光电导开关产生太赫兹波,可以探测到整个频带内的振幅和相位投影信息,图 9(a)为三维光谱层析实验装置原理图,(b)为实验结果。

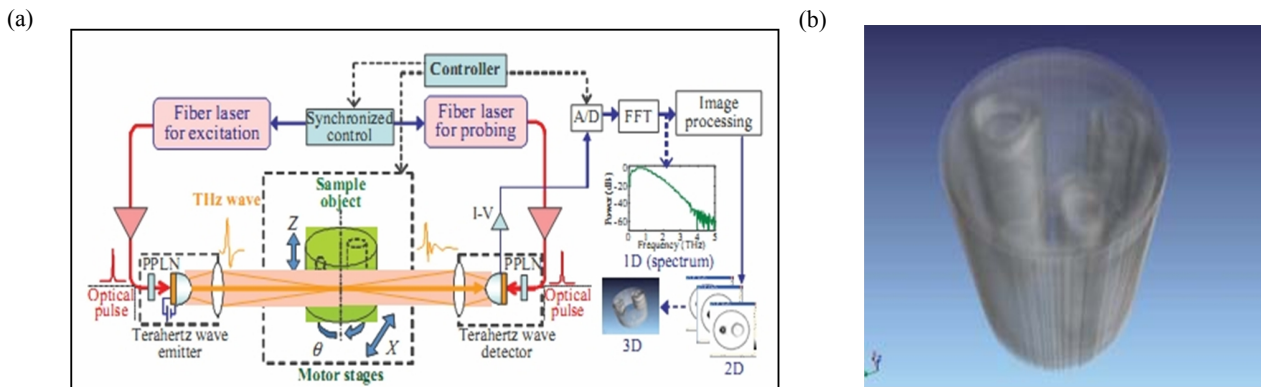


图9 三维光谱层析实验装置及其成像结果: 原理图(a)及实验结果(b)<sup>[64]</sup>

Fig.9 Three-dimensional spectrum chromatography system and its imaging results: (a) Schematic diagram and (b) Experimental results<sup>[64]</sup>

同年, Buma T.等人通过将综合孔径聚焦技术与逐点成像技术结合, 实现了对目标三维图像的构建<sup>[65]</sup>。此外他们利用一种加权求和的算法, 使重建图像中出现的旁瓣假象问题得到解决。Abraham 等人通过太赫兹脉冲成像研究了折射率大的物体对三维层析成像的影响<sup>[66]</sup>。2011年, 电子科技大学使用 CO<sub>2</sub> 泵浦 CH<sub>3</sub>OH 产生太赫兹波, 并设计了面阵探测器连续 THz 层析成像系统<sup>[67]</sup>。2012年, 圣安德鲁大学设计了 0.34 THz 超外差三维成像雷达系统, 该系统通过发射共极化、接收共极化以及交叉极化用于显示和处理。此项目开始于 2008 年, 通过不断地改进, 在 20 m 处获得 10 frames/s 的成像帧速率<sup>[68-69]</sup>。2016年, S. Tripathi 等人在窄线宽、可调谐太赫兹参量源和太赫兹转换频率上转换探测技术对塑料物体进行 CT 成像, 由于该方法将太赫兹频率的探测转换到近红外波段探测, 在 1.5 THz 附近探测动态范围可达 90 dB, 很好地反映出物体内部信息以及缺陷位置<sup>[70]</sup>。2017年, 周涛等人利用单载流子光电二极管 (uni-traveling-carrier photo diode, UTC-PD) 产生 90~140 GHz 低相干太赫兹辐射, 成功重建了陶瓷样品的三维图像, 表明了太赫兹波在无损伤检测中具有巨大的实用价值<sup>[71]</sup>。

### 1.6 太赫兹差分成像和偏振成像

在 THz-TDS 技术中, 利用差分探测技术可以进一步提高太赫兹脉冲的稳定性、准确性以及信噪比<sup>[72]</sup>。差分探测技术由于没有使用正交偏振片, 利用动态相减技术有效抑制了噪声信号, 提升了探测信号的强度。

2004年, Hattori T 和 Rungsawang R 等人<sup>[73-74]</sup>通过使用太赫兹实时成像光学外差探测技术, 提高了测量的线性程度, 但是信噪比偏低, 不够理想。2007年, Pradarutti 等人设计了一套成像系统, 基本上实现了差分成像, 但是由于像素点较少, 不能进行实时成像<sup>[75]</sup>。Kitahara 等通过将 1/4 波片、CMOS 摄像头以及线阵偏振片结合, 成功实现了相邻像素的差分成像<sup>[76]</sup>。

2010年, Wiegand 等人分别将太赫兹波与探测波进行线聚焦, 利用两个线阵 CMOS 摄像头并结合差分探测技术, 实现了太赫兹差分成像。该系统采用带有振荡器的激光光源, 使太赫兹实时成像系统的可集成性能得到提高<sup>[77]</sup>。

在太赫兹成像技术中, 多数采用光电导采样和电光采样的方法测量太赫兹脉冲, 基本上忽略了其中存在的偏振因素。为了提高成像系统的信息获取能力, 可以通过改变探测光的偏振态实现对不同太赫兹偏振分量的高精度测量。

2005年, Planken 等人研发了新的光学探测技术, 实现了对太赫兹偏振态的测量, 其光路系统图参照文献<sup>[78]</sup>。2006年, Rutz 等人使用 THz-TDS 成像技术, 测量了有关液晶聚合物的双折射特性, 并使用太赫兹逐点成像技术探测到样品中光轴方向的变化情况, 但该技术并没有观测到样品内部的状况<sup>[79]</sup>。2009年, Jordens 等采用一种新的数据处理方式, 利用太赫兹时域脉冲的光谱特性, 能够观察到样品内部的分布呈现各向异性<sup>[80]</sup>。2010年, L. Zhang 等人把石英晶体作为偏振器, 由于石英晶体对太赫兹偏振分量的时间延迟不同, 可提取样品的偏振信息<sup>[81]</sup>, 并利用此方法对泡沫的偏振信息进行了测量。

在国内对太赫兹差分成像和偏振成像有较深入研究的有张岩团队<sup>[14,75]</sup>, 为了提高成像系统的信噪比以及成像系统的信息获取能力分别引入以下两种技术:

①将差分电光探测技术引入成像系统, 使得单像素太赫兹信号的信噪比可以达到 20 dB; ②通过改变探测光的偏振态实现对不同太赫兹偏振分量的高精度测量, 提升了探测灵敏度和精确度, 图 10 为该团队对太赫兹脉冲焦平面成像系统的改进。

### 1.7 其他太赫兹成像技术的研究

随着科学技术的发展太赫兹成像技术取得重大进步, 许多关键技术得到突破, 使太赫兹成像的分辨率、

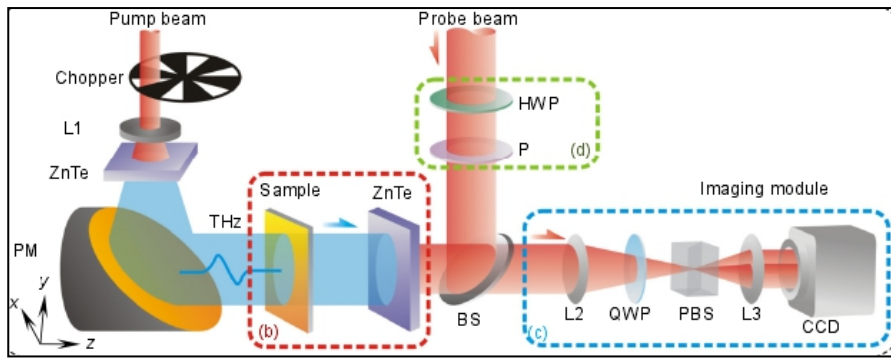


图 10 改进型太赫兹脉冲焦平面成像系统<sup>[14]</sup>

Fig.10 Improvement of THz pulsed focal plane array imaging system<sup>[14]</sup>

灵敏度、响应频率带宽以及响应时间不断得到提升。下面介绍比较有代表性的有关太赫兹成像技术的前沿研究,可以看出太赫兹成像技术的快速发展。

2007年,德国的法兰克福大学研制了 Hybrid 系统<sup>[82]</sup>,该系统可以将连续的太赫兹波分成两束,其中一束用于对物体的探测,另一束不携带任何信息仅作为参考。通过对两束太赫兹波进行比较能够实现高分辨率的连续太赫兹波成像。

2010年,韩国 Lee K 等人<sup>[83]</sup>研究了基于相干光学的太赫兹压缩感知理论(Compress sensing, CS)的成像方式。CS 理论主要用于信号分析,它通过开发信号的稀疏特性,在远小于 Nyquist 采样率的条件下,用随机采样的方式获取信号的离散样本,然后通过非线性算法重建信号。目前它在光学、信息处理、微波成像、模式识别等领域受到了广泛的关注,在 2007 年被美国科技评论评为年度十大科技进展。2011 年,美国哈佛大学 Yu 等人<sup>[84]</sup>第一次提出了超表面的概念,研发了亚波长金属天线器件,该器件对可见光场具有特殊的调制作用。2012 年, Han 等人<sup>[85]</sup>通过使用 130 mm 数字 CMOS 技术集成的 280 GHz 4×4 SBD 成像探测阵列,在不需要使用复杂的光学系统下,成功实现了电子多像素扫描成像,响应率达到 5.1 kV/W, NEP = 2.9×10<sup>-11</sup> W/Hz<sup>1/2</sup>。SBD THz 具有响应速度快、灵敏度高,室温工作的特点,但寄生电容在高频下工作时会对器件性能产生影响。

2015 年,中国科学院上海技术物理研究所(Shanghai Institute of Technical Physics, SITP)黄志明研究员采用窄禁带半导体成功实现了 0.3~3.0 THz 的宽波段、高灵敏度、低噪声等效功率和快速响应的太赫兹探测器件<sup>[86]</sup>,并证明了通过光子的波动性产生新型光电效应规律实现高灵敏度太赫兹探测的可行性,该项工作为太赫兹探测技术的突破提供了重要技术途径,该探测器原理图见图 11。

2017 年,吴福伟等人研究了 220 GHz 波段的太赫

兹合成孔径成像雷达,图 12 为太赫兹 SAR 成像雷达系统图<sup>[87]</sup>,实验结果显示太赫兹 SAR 成像雷达系统分辨率可以达到 3 cm。实验表明太赫兹 SAR 成像雷达系统比光电传感器具有更强的穿透能力,其成像速度也优于传统的微波雷达。

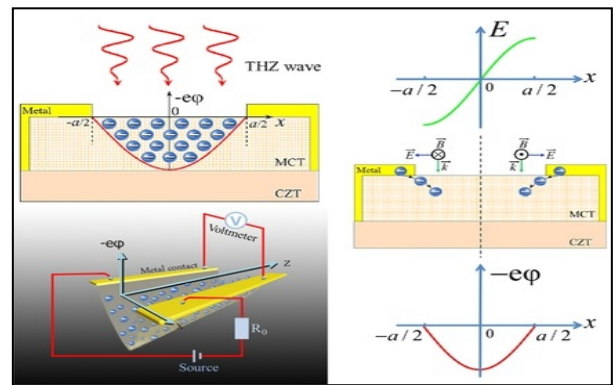


图 11 基于窄禁带半导体的太赫兹探测器原理图<sup>[86]</sup>

Fig.11 Schematic diagram of a THz detector based on narrow bandgap semiconductors<sup>[86]</sup>

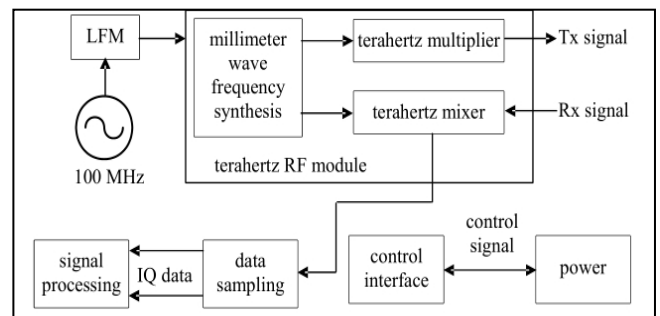


图 12 太赫兹 SAR 成像雷达系统<sup>[87]</sup>

Fig.12 THz SAR imaging radar system<sup>[87]</sup>

2017 年,刘力源等人<sup>[88]</sup>研制了基于 CMOS 工艺并结合了低噪声信号处理技术的 THz 成像系统,该系统使用了太赫兹天线、高电压响应晶体管以及 THz 匹配网络。在室温条件下,该系统具有较高的图像分辨率与成像质量,且 NEP < 1.06×10<sup>-10</sup> W/Hz<sup>1/2</sup>。

2019 年,鲁远甫团队提出并实现了一种基于空间



傅里叶谱的新型太赫兹单像素成像技术<sup>[89]</sup>。通过使用空间光调制器(digital micromirror device, DMD)产生正弦条纹对入射到硅基石墨烯上的太赫兹光束进行调制,然后太赫兹单像素探测器获取物体二维图像的空间傅里叶谱,最后通过逆傅里叶变换重构出成像目标的二维图像。实验结果表明,该方法能够极大地减少测量次数,在保证成像质量的前提下提高成像效率,测量次数仅需图像像素数的11.8%就能重构出清晰的太赫兹图像。图13(a)为太赫兹单像素成像系统示意图、(b)成像压缩比及(c)样品成像图。

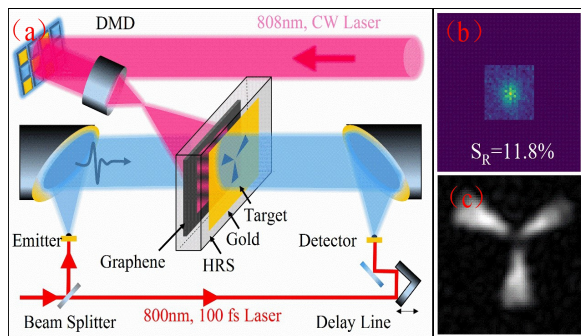


图13 新型太赫兹单像素成像技术:(a)系统示意图;(b)成像压缩;(c)样品成像图<sup>[89]</sup>

Fig.13 Novel THz single-pixel imaging technology: (a) System schematic diagram; (b) Image compression ratio; (c) Sample image<sup>[89]</sup>

从THz-TDS成像技术发展历程可以看出,通过不断地在太赫兹成像系统中使用新的技术,如太赫兹焦平面成像、近场成像、三维成像、改变半导体禁带宽度以及像素模式等技术,不仅可以提高太赫兹成像系统的探测灵敏度和分辨率等性能,而且对太赫兹成像设备趋向小型化、实用化也有很大的促进作用。从发展趋势也可以看到太赫兹成像技术在半导体等材料性能表征方面也会逐渐得到重视。

## 2 室温微测辐射热计太赫兹成像技术

许多太赫兹成像器件需要在室温下工作,因此开展室温下的太赫兹成像技术研发是十分必要的。通过使用热敏微桥结构的太赫兹探测器不仅具有探测波段宽、阵列规模大、集成度高、实时成像等显著特点,而且使系统更加趋于小型化、便携式以及实用化<sup>[90]</sup>。

2005年,麻省理工学院首次采用非制冷红外氧化钒焦平面探测器实现了连续波THz透射成像。探测系统使用BAE Systems公司160×120非制冷红外焦平面相机和2.52 THz气体激光器<sup>[91]</sup>。2011年,Coppinger使用商用的非制冷红外探测器进行了成像实验,该探测器虽然对10 μm红外辐射吸收约为90%,但对太赫

兹辐射吸收不高,因此探测性能较差<sup>[92]</sup>。

2008年,日本电器公司(NEC)首次优化VO<sub>x</sub>THz探测器探测单元的微桥结构,即在双层微桥的顶层增加一层太赫兹吸收层对太赫兹辐射阻抗进行调制<sup>[93]</sup>。该系统结构图见图14。

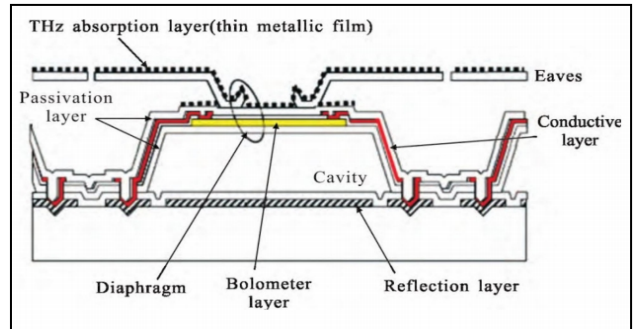


图14 双层微桥结构太赫兹探测示意图<sup>[93]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of double-layer microbridge structure for terahertz detection<sup>[93]</sup>

2009年,加拿大INO公司设计了基于VO<sub>x</sub>热敏材料的太赫兹成像所需要的光学镜头,并进行了成像实验<sup>[94]</sup>。之后,INO公司制备了160×120阵列的抗反射涂层结构,实现了对5 mm厚度的聚乙烯塑料遮挡金属刀片的透射成像<sup>[95]</sup>。此外该公司又提出了采用黑金材料、金属薄膜、蝶形天线等方式提高对太赫兹辐射的吸收<sup>[96]</sup>。2011年,INO公司分析了不同探测单元尺寸对太赫兹探测成像效果影响,随着探测单元尺寸的减小,成像分辨率不断提高。INO公司研制了312 μm像素尺寸的微桥结构,测试发现微桥结构存在明显的形变<sup>[97]</sup>。2012年,INO公司又提出了折反式太赫兹探测成像镜头和微扫描的图像处理方法,改善了太赫兹成像质量<sup>[98]</sup>。2013年,INO公司推出了384×288阵列规模太赫兹相机,该相机在1.04 THz处的NEP=50 pW·Hz<sup>-1/2</sup>,可对信封内的刀片进行透射成像<sup>[94]</sup>。2012年,法国CEA-Leti研制了单片多光谱探测器<sup>[99]</sup>,该系统由红外探测器、发光二极管以及α-Si THz微测辐射热计组成,能够进行可见光、红外和太赫兹波段的成像,且该系统的NEP<10<sup>-11</sup> W/Hz<sup>1/2</sup>。2018年,Marchese报道了针对目标物镜的优化设计,透镜的F数由0.95降低到0.60,聚焦长度为44 mm,使太赫兹透射图像的质量得到明显改善<sup>[100]</sup>。

由此可见太赫兹成像技术通过引入热敏微桥结构,不仅使太赫兹系统成像质量得到明显提高,而且使其具有室温工作、实时成像、小型化和实用化等特点。

## 3 太赫兹成像技术的应用

随着对太赫兹成像技术研究的不断深入,各国越

来越认识到了太赫兹成像技术的重要性。尤其是美国在太赫兹成像技术的领域取得了很大进步,之后一些欧洲国家在太赫兹领域也取得了许多重要研究成果。我国虽然在太赫兹研究领域起步较晚,但我国对太赫兹技术的发展给予了高度重视和大力支持,极大推动了我国太赫兹技术的快速发展。

太赫兹成像技术所表现出的优异特性可应用于国家安全、安全检查、生物医学、无损检测、目标雷达成像、环境监测和天文研究等领域,具有十分重要的实用价值和学术价值。

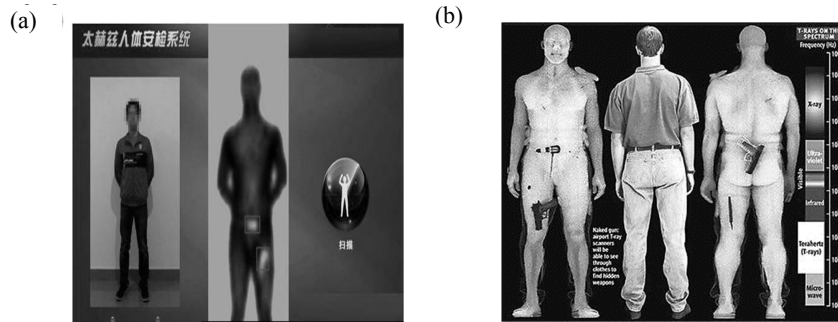


图 15 太赫兹成像技术在安全检查方面的应用: (a) 为中国电科 38 所研制太赫兹人体安检仪系统成像; (b) 为诺·格公司研制的太赫兹安检仪成像

Fig.15 The application of THz imaging technology in security inspection: (a) Imaging for the THz human security detector system developed by China Electric Power 38 Institute; (b) Imaging for the THz security detector developed by Northrop Grumman

### 3.2 无损检测

太赫兹波能够穿透几千毫米厚的泡沫等材质,探测到其中的缺陷,可以为航天飞机以及卫星的安全提供保障。图 16(c)为金属缺陷处的太赫兹波图像, (d)为泡沫板缺陷检测结果,检测结果来源于美国伦斯勒理工大学太赫兹研究中心<sup>[102]</sup>。

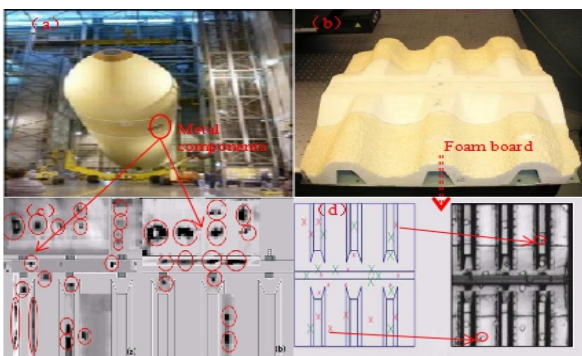


图 16 航天飞机缺陷处的太赫兹图像  
Fig.16 THz image of space shuttle defect

### 3.3 生物医学

太赫兹辐射不仅具有较低的电离辐射,而且很多生物大分子以及 DNA 分子的旋转及振动能级大多处于太赫兹波段内,生物组织对太赫兹波具有独特的响

### 3.1 安全检查

太赫兹波具有强穿透性和低辐射特性,与 X 射线相比安全性更高,它不会引起生物组织的有害电离反应,对生物产生的安全问题更小,极大弥补了 X 射线检测和其他检测技术的缺陷<sup>[101]</sup>。这在旅客身体的安全检查 and 生物样品的检查等方面至关重要。图 15 为太赫兹成像技术在安全检查方面的应用,图 15(a)为中国电科 38 所研制太赫兹人体安检仪系统成像,图 15(b)为诺·格公司研制的太赫兹安检仪成像。

应。因此太赫兹技术能够对生物组织进行检查,判断生物组织是否发生病变,以便及时治疗。

此外太赫兹成像具有很好的光谱分辨特性,可以快速确定受伤或者病变的组织,图 17 为肿瘤组织的太赫兹图像<sup>[103-104]</sup>。

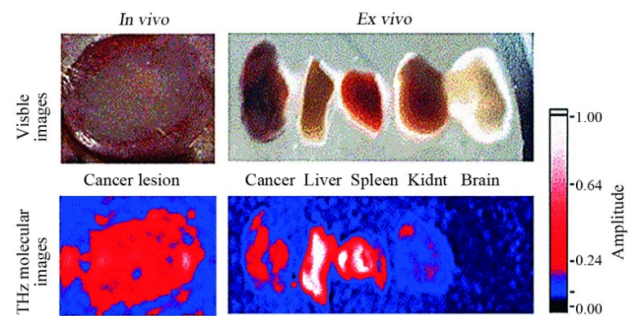


图 17 体内和体外肿瘤组织的太赫兹图像<sup>[103]</sup>

Fig. 17 THz images of tumor tissue in vivo and in vitro<sup>[103]</sup>

### 3.4 国家安全

由于太赫兹波具有很强的穿透能力,经过实验证明,太赫兹辐射可以穿透木质、土质等非金属墙体,从而获得室内图像。通过太赫兹成像技术从墙外掌握室内情况,对保障反恐人员安全与反恐任务的执行,起到了重要的作用。

### 3.5 环境监测和天文研究

太赫兹成像技术不仅可以对大气中的一氧化碳(CO)、水(H<sub>2</sub>O)、氮气(N<sub>2</sub>)、氧气(O<sub>2</sub>)等气体进行探测<sup>[105]</sup>,而且宇宙中大部分物质发出的电磁波处于太赫兹波段,因此太赫兹成像可以对宇宙中冷暗区域进行探测和成像,如研究黑洞的形成和对遥远天体的观测<sup>[106-109]</sup>,见图18。

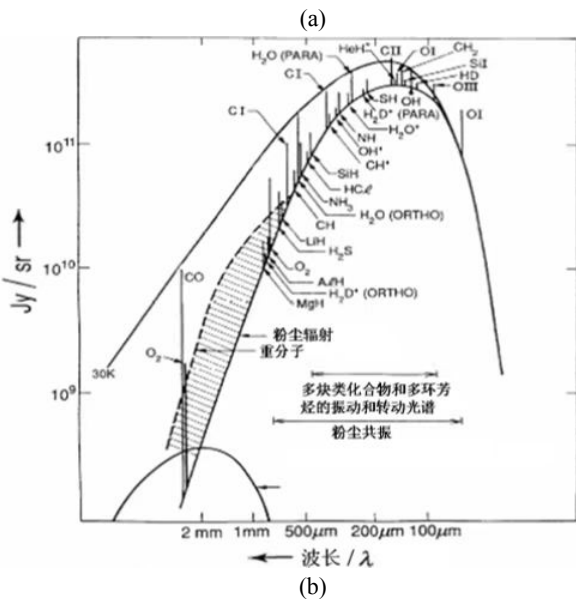


图18 太赫兹成像技术在环境和天文领域的应用:环境监测(a)以及天文研究(b)<sup>[109]</sup>

Fig.18 The application in enviroment and astronomy field: of terahertz imaging technology: in environmental monitoring (a) and astronomical research (b)<sup>[109]</sup>

### 4 太赫兹成像技术限制因素

虽然太赫兹成像技术在许多方面具有很大的优势,但也存在一定的局限性,主要体现在以下几个方面:

①由于水分子对太赫兹波吸收很强,因此对含水

量较多的物体无法进行清晰成像,这就对太赫兹技术在医学生物组织检测等方面的应用带来了一定的限制。空气中所含的水气也会极大影响了太赫兹技术的探测距离。

②太赫兹探测器对温度比较敏感,外界温度的变化会对探测结果产生影响。因此在进行成像实验时尽量保持温度恒定。

③由于太赫兹成像过程中存在耗时问题,时间过长会对样品成像质量产生一定的影响。可通过使用大面积电光晶体(如, LiNbO<sub>3</sub>、GaSe、ZnTe)与 CCD、CMOS 相机结合缩短成像时间。

④采用反射式太赫兹成像系统,应该确保太赫兹信号正入射到样品的表面,否则经过透镜反射的太赫兹波与样品反射的太赫兹波会产生干涉,对成像结果造成影响。

⑤太赫兹信号在输出功率和带宽上存在输出功率低、带宽窄的问题。此外在研究太赫兹源时还应该考虑到稳定性、高效、环保等问题。

⑥当可疑物品被金属遮挡时,太赫兹成像技术就无法发挥作用,这时可以结合其他探测技术,如金属探测器等。

⑦室温下具有微桥结构的太赫兹成像系统,无法进行被动成像,因此在成像时需要结合外部太赫兹辐射源;此外该系统在高频太赫兹波段探测性能较好,但在低频段响应偏低。

由于我国的太赫兹成像技术起步较晚,在关键技术方面还不太成熟,在太赫兹辐射、太赫兹传输、太赫兹调制方式、太赫兹探测等方面都需要进一步提高、完善。

### 5 总结与展望

本文综述了太赫兹成像技术的主要研究进展,介绍了太赫兹成像技术的典型应用,可以看出太赫兹成像技术应用范围日益广泛,得到越来越多国家的重视。太赫兹成像系统必须满足高分辨率、实时性好、便携性以及灵敏度高性能的要求。

对于目前可以有效改进太赫兹成像性能的技术手段,我们认为可以从以下几点考虑:

①通过使用高性能材料(如石墨烯、硅烯、黑磷等),利用新材料的优异性能不断研发新的器件。

②通过使用超表面结构增加对太赫兹辐射的耦合吸收。

③通过消除背景噪声与干涉效应,提高太赫兹成像系统获取信息的能力,例如可以发展单像素成像、CS 理论以及优化光学系统等技术。

④通过引入太赫兹天线,将 THz 能量耦合到探测器的探测单元上,提高对太赫兹辐射的收集能力。

⑤相比传统的太赫兹成像器件,微桥结构的太赫兹焦平面探测阵列器件具有探测波段宽、阵列规模大、集成度高、实时成像、小型化、便携式以及实用化等优势。

我国太赫兹成像技术起步较晚,有许多关键技术还需要攻克,所以需要科学研究机构和产业集团加强合作,研制出拥有自主知识产权的太赫兹成像技术,使太赫兹成像技术在我国形成产业化,更好地为我国的国防和民生建设服务。

### 参考文献:

- [1] 李继强,沈韬,孙淑红,等.太赫兹技术在太阳能电池领域的应用进展[J].应用物理,2018,8(5):193-203.  
LI Jiqiang, SHEN Tao, SUN Shuhong, et al. The progress of the application of terahertz technology in solar cells[J]. *Applied Physics*, 2018, 8(5): 193-203.
- [2] 王春平,屈惠明,陈钱.新型红外成像技术[J].光电子技术,2007,27(1):44-48.  
WANG Chunping, QU Huiming, CHEN Qian. New infrared imaging technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, 27(1): 44-48.
- [3] 赵国忠.太赫兹光谱和成像应用及展望[J].现代科学仪器,2006(2):36-40.  
ZHAO Guozhong. Application and outlook of THz spectroscopy and imaging[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006(2): 36-40.
- [4] 杨昆,赵国忠,梁承森,等.脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J].中国激光,2009,36(11):2853-2858.  
YANG Kun, ZHAO Guozhong, LIANG Chengsen, et al. Comparison of the properties of pulse THz wave imaging with continuous-wave THz imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2853-2858.
- [5] Auston D H, Smith P R. Generation and detection of millimeter wave by picosecond photoconductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 43(7): 631-633.
- [6] Fattinger C, Grischkowsky D. Terahertz Beams[J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 54(6): 490-492.
- [7] XU L, ZHANG X C, Auston D H. Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in the electro-optic materials[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(15): 1784-1786.
- [8] HU B B, ZHANG X C, Auston D H. Free-space radiation from electro-optic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(6): 506-508.
- [9] 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): 400-413.
- [10] Hamster H, Sullivan A, Gordon S, et al. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(17):2725-2728.
- [11] Hamster H, Sullivan A, Gordon S, et al. Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas[J]. *Physical Review E*, 1994, 49(1): 671-677.
- [12] XIE X, DAI J, ZHANG X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(7): 075005 1-4.
- [13] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716.
- [14] 王新柯,张岩.太赫兹脉冲焦平面成像技术的发展与应用[J].光电工程,2020,47(5):28-45.  
WANG Xinke, ZHANG Yan. The development and application of THz pulse focal plane imaging technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 28-45.
- [15] 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.
- [16] Banerjee D, Spiegel W von, Thomson M D, et al. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 9060-9066.
- [17] ZHANG X C. Recent progress of terahertz imaging technology[C]// *Proc. of 2002 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*, 2002: DOI:10.1109/COMMAD.2002.1237176.
- [18] JIANG Z, XU X G, ZHANG X C. Improvement of terahertz imaging with a dynamic subtraction technique[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(17): 2982-2987.
- [19] ZHONG H, Redo-Sanchez A, ZHANG X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9130-9141.
- [20] Yasui T, Sawanaka K, Ihara A, et al. Real-time terahertz color scanner for moving objects[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1208-1221.
- [21] 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.
- [22] Blanchard F, Doi A, Tanaka T, et al. Real-time terahertz near-field microscope[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8277-84.
- [23] ZHANG L L, Karpowicz, N, ZHANG C L, et al. Real-time non-destructive imaging with THz waves[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1473-1475.
- [24] 陈素果,侯磊,楼晓,等.太赫兹波脉冲成像和连续波成像技术研究[J].西安理工大学学报,2013,29(2):127-132.  
CHEN Suguo, HOU Lei, LOU Xiao, et al. Investigation of terahertz continuous wave imaging and pulse wave imaging[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(2): 127-132.
- [25] Sakamoto M, Hattori T. Deformation corrected real-time terahertz imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(26): 261101-261106.
- [26] Yasuda T, Kawada Y, Toyoda H, et al. Terahertz movie of internal transmission imaging[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15583-15588.
- [27] Tait C R, Werley C A, Nelson K A, et al. Comparison of phase-sensitive imaging techniques for studying terahertz waves in structured LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Journal of the Optical Society of America, B. Optical Physics*, 2010,

- 27(11): 2350-2359.
- [28] 徐利兵. 电子学太赫兹技术研究概述[J]. 中国新通信, 2013, 15(22): 3-4.  
XU Libing. An overview of electronic terahertz technology research[J]. *China New Communications*, 2013, 15(22): 3-4.
- [29] Han S, Kim N, Lee W, et al. Real-time imaging of moving living objects using a compact terahertz scanner[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(2): 022501.
- [30] YANG J, RUAN Shuangchen, ZHANG MIN, et al. Real-time continuous -wave imaging with a 1.63 THz OPTL and a pyroelectric camera[J/OL]. *Optoelectronics Letters*, 2008, 4(DOI: <https://DOI.org/10.1007/s11801-008-8036-0>).
- [31] YAO R, LI Q, WANG Q. 1.63 THz transmission imaging experiment by use of a pyroelectric camera array[C]// *Photonics and Optoelectronics Meetings POEM*, 2008: 72770D-72771D.
- [32] YAO R, LI Q, DING S H, et al. Investigation on 2.45 THz array transmission imaging[C]// *Proceedings of SPIE*, 2009, 7385: 73850P.
- [33] 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): 242-247.  
YAO Rui, DING Shenghui, LI Qi, et al. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 242-247.
- [34] Hunsche, S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1-6): 22-26.
- [35] 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.
- [36] Moon, K., Do, Y, Lim, M, et al., Quantitative coherent scattering spectra in apertureless terahertz pulse near-field microscopes[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(1): 011109-1-011109-4.
- [37] 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.
- [38] Kuschewski F, H G von Ribbeck, Doering J, et al. Narrow-band near-field nanoscopy in the spectral range from 1.3 to 8.5 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(11): 113101-113102.
- [39] Degl Innocenti R, Wallis R, Wei B, et al. Terahertz nanoscopy of plasmonic resonances with a quantum cascade laser[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2150-2157.
- [40] Liewald C, Mastel S, Hesler J, et al. All-electronic terahertz nanoscopy[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 159-163.
- [41] 岳东东, 游冠军. 散射式太赫兹扫描近场光学显微技术研究[J]. 光学仪器, 2020, 42(2): 64-69.  
YUE Dongdong, YOU Guanjuan. Study on scattering-type terahertz scanning near-field optical microscopy[J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(2): 64-69.
- [42] Salhi M A, Koch M. Semi-confocal imaging with a THz gas laser[C]// *Proc. of SPIE on Millimeter-Wave and Terahertz Photonics*, 2006, 6194: 6194A(<https://DOI.org/10.1117/12.662024>).
- [43] Salhi M A, Koch M. Confocal THz imaging using a gas laser[C]// *33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Pasadena: 2008: 1-2(DOI: 10.1109/ICIMW.2008.4665481).
- [44] Salhi M, Koch M. High resolution imaging using a THz gas laser [C/OL]// *EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology*, 2008: <https://igsm.tu-bs.de/publication/2008/high-resolution-imaging-using-thz-gas-laser>.
- [45] Salhi M A, Pupeza I, Koch M. Confocal THz laser microscope[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2010, 31(3): 358-366.
- [46] Zinovev N. N., Andrianov A V, Gallant A J, et al. Contrast and resolution enhancement in a confocal terahertz video system[J]. *JETP Letters*, 2008, 88(8): 492-495.
- [47] LIM M, KIM J, HAN Y, et al. Perturbation analysis of terahertz confocal microscopy[C]// *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008: 757-758.
- [48] R U Siciliani de Cumis, XU J H, Masini L, et al. Terahertz confocal microscopy with a quantum cascade laser source[C]// *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012: 1-2.
- [49] Hwang Y, Ahn J, Mun J, et al. In vivo analysis of THz wave irradiation induced acute inflammatory response in skin by laser-scanning confocal microscopy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11465-11475.
- [50] 张艳东. 连续太赫兹波成像技术的检测应用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008.  
ZHANG Yandong. Research on the Detection and Application of Continuous Terahertz Wave Imaging Technology[D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.
- [51] 丁胜晖, 李琦, 姚睿, 等. THz 共焦扫描成像图像处理方法初步研究 [C]// *第九届全国光电技术学术交流会*, 2010: 656-660.  
DING Shenghui, LI Qi, YAO Rui, et al. THz preliminary study on confocal scanning and imaging image processing method[C]// *9th National Optoelectronics Technology Academic Exchange Association*, 2010: 656-660.
- [52] 邸志刚, 姚建铨, 贾春荣, 等. 太赫兹成像技术在无损检测中的实验研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1163-1166.  
DI Zhigang, YAO Jianquan, JIA Chunrong, et al. Experimental study on terahertz imaging technique in nondestructive inspection[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1163-1166.
- [53] 黄亚雄, 姚建铨, 凌福日, 等. 基于相干层析的太赫兹成像技术研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1261-1265.  
HUANG Yaxiong, YAO Jianquan, LING Furi, et al. Terahertz imaging technology based on coherent tomograph[J]. *Laser and Infrared*, 2015, 45(10): 1261-1265.
- [54] Dengler, R J, Cooper K B, Chattopadhyay G, et al. 600 GHz imaging radar with 2 cm range resolution[C]// *International Microwave Symposium*, 2007: (DOI: 10.1109/MWSYM.2007.380468).
- [55] Cooper, K B, Dengler R J, Llombart N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[C]// *IEEE Transactions on Terahertz*

- Science and Technology*, 2011, **1**(1): 169-182.
- [56] Essen H, Wahlen A, Sommer R, et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar[J]. *Electronics Letters*, 2007, **43**(20): 1114-1116.
- [57] 胡伟东, 张萌, 武华锋, 等. 频率步进太赫兹脉冲成像技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1605-1608.  
HU Weidong, ZHANG Meng, WU Huafeng, et al. Research on step-frequency terahertz pulses imaging technology[J]. *Strong Laser and Particle Beam*, 2013, **25**(6): 1605-1608.
- [58] Sheen, D M, McMakin D, Barber J, et al. Active imaging at 350 GHz for security applications[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6948** (DOI: 10.1117/12.778011).
- [59] Sheen D M, Hall T E, Severtsen R H, et al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system[C]//*Proceedings of SPIE*, 2010, **7670**(1): 115-118(DOI: 10.1117/12.852788).
- [60] Spiegel W V, Weg C A, Henneberger R, et al. Active THz imaging system with improved frame rate[C]//*Proceedings of SPIE*, 2009, **7311**: DOI: 10.1117/12.817925.
- [61] Quast H, Löffler T. 3D-terahertz-tomography for material inspection and security[C]//*International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009: 513-514.
- [62] 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.
- [63] Brahm A, Wilms A, Tymoshchuk M, et al. Optical effects at projection measurements for Terahertz tomography[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, **62**: 49-57.
- [64] Kato E, Nishina S, Irisawa A, et al. 3D spectroscopic computed tomography imaging using terahertz waves[C]//*35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010: 1-2(DOI: 10.1109/ICIMW.2010.5612981).
- [65] Buma T, ZHANG Z. Adaptive image reconstruction for sparse arrays using single-cycle terahertz pulses[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10): 1680-1682.
- [66] Abraham E, Younus A, Aguerre C, et al. Refraction losses in terahertz computed tomography[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2050-2055.
- [67] 郑德伟. 连续太赫兹波层析成像实验研究[D]. 成都: 电子科技大学 2011.  
ZHENG Dewei. Continuous Terahertz Wave Tomography Experimental Research, Chengdu: University of Electronic Technology, 2011.
- [68] Robertson D, Marsh P, Bolton D, et al. 340-GHz 3D radar imaging test bed with 10 Hz frame rate. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8362**: (DOI: 10.1117/12.918581).
- [69] 梁美彦, 邓朝, 张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, **11**(2): 189-198.  
LIANG Meiyuan, DENG Chao, ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. *Teahertz Journal of Science and Electronic Information*, 2013, **11**(2): 189-198.
- [70] Tripathi S R, Sugiyama Y, Murate K, et al. Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6): 6433.
- [71] ZHOU T, ZHANG R, YAO C, et al. Terahertz three-dimensional imaging based on computed tomography with photonics-based noise source[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, **34**(8): 084206.
- [72] WANG X, YE J, ZHANG Y, et al. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(23): 4626-4632.
- [73] Hattori T, Ohta K, Rungsawang R, et al. Phase-sensitive high-speed THz imaging[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2004, **37**(5): 770-773.
- [74] Rungsawang R, Mochiduki A, Ookuma S, et al. 1-kHz real-time imaging using a half-cycle terahertz electromagnetic pulse[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(8/11): L288-L291.
- [75] 王新柯. 太赫兹实时成像中关键技术的研究与改进[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
WANG Xinke, Research and Improvement of Key Technologies in THz Live Imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [76] Kitahara H, Tani M, Hangyo M. Two-dimensional electro-optic sampling of terahertz radiation using high-speed complementary metal-oxide semiconductor camera combined with arrayed polarizer[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(9): 91111-91119.
- [77] Wiegand C, Herrmann M, Bachtler S, et al. A pulsed THz imaging system with a line focus and a balanced 1-D detection scheme with two industrial CCD line-scan cameras[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 5595.
- [78] Planken P C M, W A M van der Marel, N C J van der Valk. Terahertz polarization imaging[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(20): 2802-2804.
- [79] Rutz F, Richter H, Ewert U, et al. Terahertz birefringence of liquid crystal polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(22): 221911.
- [80] Jordens C, Maik S, Wichmann M, et al. Terahertz birefringence for orientation analysis[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(11): 2037-2044.
- [81] ZHAO Y, ZHANG L, ZHANG C, et al. Terahertz polarization imaging with birefringent materials[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(24): 4993-4995.
- [82] Löffler T, Thilo M, CA W, et al. Continuous-wave terahertz imaging with a hybrid system[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(9): 91111.
- [83] Lee K, JIN K H, YE J C, et al. Coherent optical computing for terahertz imaging[C]//*CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications*, 2010: 1-2.
- [84] YU N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333-337.
- [85] Han R, ZHANG Y, Kim Y, et al. Terahertz image sensors using CMOS Schottky barrier diodes[C]//*International SoC Design Conference*, 2012: 254-257(DOI: 10.1109/ISOCC.2012.6407088).
- [86] HUANG Z M, ZHOU W, TONG J C, et al. Extreme sensitivity of room-temperature photoelectric effect for terahertz detection[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(1): 112-117.

- [87] 吴福伟, 刘振华, 李大圣, 等. 220 GHz 太赫兹合成孔径雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(3): 368-371.  
WU Fuwei, LIU Zhenhua, LI Dasheng, et al. A 220 GHz terahertz synthetic aperture radar[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(3): 368-371.
- [88] LIU Z Y, LIU L Y, YAN J G, et al. A fully-integrated 860-GHz CMOS terahertz sensor[C]//*Solid-state Circuits Conference*, 2015: 1-4(DOI: 10.1109/ASSCC.2015.7387437).
- [89] SHE R, LIU W, LU Y, et al. Fourier single-pixel imaging in the terahertz regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(2): 21101.
- [90] 王军, 蒋亚东. 室温微测辐射热计太赫兹探测阵列技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 12-21.  
WANG Jun, JIANG Yadong. Technical research progress in room temperature radiation technology (specially invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 12-21.
- [91] Lee A. W., Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2563-2565.
- [92] Knyazev B A, Dem'Yanenko A A, Esaev D G. Terahertz imaging with a 160 × 120 pixel microbolometer 90-fps camera[J]. 2007 *Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics*, 2007: 360-361.
- [93] Seiji Kurashina, Naoki Oda. Bolometer-type terahertz wave detector: US08618483B2[P]. [2013-12-31].
- [94] Pope T, Doucet M, Dupont F, et al. Uncooled detector, optics, and camera development for THz imaging[J]. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7311: 73110L-73119L.
- [95] Hosako I, Sekine N, Oda N, et al. A real-time terahertz imaging system consisting of terahertz quantum cascade laser and uncooled microbolometer array detector[C]//*Conference on Terahertz Physics, Devices, and Systems V: Advanced Applications in Industry and Defense*, 2011: 1-6.
- [96] Oulachgar H, Linda Marchese, Christine Alain, et al. Development of MEMS microbolometer detector for THz applications[C]//*International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010)*, 2010: 1-2(DOI:10.1109/ICIMW.2010.5612408).
- [97] Oulachgar H, Bolduc M, Tremblay M, et al. Simulation and fabrication of large area uncooled microbolometers for Terahertz wave detection [C]//*International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011)*, 2011: 766-767.
- [98] Blanchard N, Marchese L, Martel A, et al. Catadioptric optics for high-resolution terahertz imager[C]//*Conference on Terahertz Physics, Devices, and Systems VI: Advanced Applications in Industry and Defense*, 2012: 1-9.
- [99] Duy-Thong N, Simoens F, Ouvrier-Bufferet J, et al. Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array-electromagnetic design, simulations and measurements[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(3): 299-305.
- [100] Marchese L, Doucet M, Blanchard N, et al. Overcoming the challenges of active THz/MM-wave imaging: an optics perspective[C/OL]//*Proc. of SPIE on Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications X*, 2018, 10639: 106392B(DOI:10.1117/12.2305398).
- [101] 朱彬, 陈彦, 邓科, 等. 太赫兹科学技术及其应用[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 304-307.  
ZHU Bin, CHEN Yan, DENG Ke, et al. Terahertz science and technology and its applications[J]. *Journal of Chengdu University: Natural Science*, 2008, 27(4): 304-307.
- [102] 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, 32(9): 583-584.  
XIE Xu, ZHONG Hua, YUAN Tao, et al. Used terahertz technology to study the cause of the space shuttle crash[J]. *Physics*, 2003, 32(9): 583-584.
- [103] Cheon H, YANG H J, Son J H. Toward clinical cancer imaging using terahertz spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-9.
- [104] 陈小婉, 蒋林华. 太赫兹技术在生物医学中的应用[J]. 激光生物学报, 2020, 29(2): 97-105.  
CHEN Xiaowan, JIANG Linhua. Application of terahertz technology in biomedicine[J]. *Laser Biology Journal*, 2020, 29(2): 97-105.
- [105] 姚建铨, 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(6): 703-707.  
YAO Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science*, 2010, 22(6): 703-707.
- [106] Bourdin H, Boulanger F, Lagache B G. Cold dust and very cold excess emission in the galaxy[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2002: 243-246(DOI: 10.1023/A:1019558719927).
- [107] ZHANG Zhiyu, Romano D, Ivison R J, et al. Stellar populations dominated by massive stars in dusty starburst galaxies across cosmic time[J]. *Nature*, 2018, 558: 260.
- [108] Stark A A., AST/RO: A small submillimeter telescope at the south pole[J/OL]. *Physics*, 2001( arXiv:astro-ph/0110429).
- [109] 黄志明, 太赫兹光学差频源[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
HUANG Zhiming, *Terahertz Optical Difference Frequency Source*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 5-6.