

太赫兹光谱探测技术发展现状与趋势*

曹恩达, 于 勇, 宋长波, 赵一鸣
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 光谱探测技术在物质识别、材料科学、生化及医药研究中有着广泛的应用。太赫兹波作为频率介于毫米波和红外之间的电磁波, 由于其独特的光谱性质, 近年来在光谱探测领域扮演着重要的角色。相比其他频段的光谱探测, 极性分子对太赫兹光谱的特性吸收和太赫兹波的强相干性, 使得太赫兹光谱探测可以直接获得材料的物化性质。首先介绍太赫兹技术原理, 然后介绍太赫兹光谱技术特点、发展历程与现状, 最后给出太赫兹光谱技术发展趋势。

关键词: 太赫兹; 光谱探测; 物质识别; 技术特点; 发展趋势

中图分类号: TN247 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0001-10

The present status and tendency of Terahertz spectral detection technology

CAO Enda, YU Yong, SONG Changbo, ZHAO Yiming
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Spectral detection has a wide range of applications in substance identification, materials science, biochemical and pharmaceutical research. Terahertz, as a section of electromagnetic spectrum locating between the millimeter wave and the infrared at frequency, plays an important role in the field of spectral detection in recent years due to its unique spectral properties. Compared with the spectral detection of other frequency bands, the characteristic absorption of the terahertz spectrum by polar molecules and the strong coherence of the terahertz wave make the terahertz spectral detection directly obtain the physical and chemical properties of the material. This article first introduces the principle of terahertz technology, then introduces the characteristics, development history and current status of terahertz spectroscopy technology, and finally gives the development trend of terahertz spectroscopy technology.

Key words: Terahertz; Spectrum detection; Material identification; Technical feature; Development direction

引 言

构成物质的分子和原子具有不同的能级结构, 由于极性分子的振动和转动能级跃迁在太赫兹单光子能量范围内, 使得极性分子在太赫兹频率范围内具有强烈的吸收光谱特性, 不同分子的化学键键能不同, 相应的太赫兹吸收光谱也会呈现出不同的吸收特征。即使是有相同化学键和分子式的手性异构分子也具有不同的太赫兹光谱特性, 这为分子提供了独特的指纹谱标识信息^[1]。因此, 通过太赫兹时域光谱探测技术可以实现物质的特征识别。进行物质光谱的研究在材料科学及其他需要分析物质成分领域具有广泛的应用价值。

太赫兹 THz (Terahertz) 是波动频率单位之一。太赫兹波是频率范围为 0.1THz~10THz 的电磁波, 波长范围为 0.03mm~3mm, 介于毫米波和红外之间^[2]。太赫兹波是人类迄今为止了解最少、开发最少的一个电磁波段, 作为电磁波谱上新开发的一个频段范围, 由于其独特的性质, 太赫兹技术在生物医学、通信、雷达以及安检等领域有着广泛的应用前景^[3,4]。太赫兹波在物质分析识别^[5-9]、检测材料内部缺陷、评估涂层厚度^[10]和密度、集成电路^[11]和超导体近场探针^[12]等多个领域有着巨大的应用价值。

本文将介绍太赫兹光谱探测技术及其特点, 分析太赫兹光谱探测技术的发展历程与现状, 并对太赫兹光谱技术发展趋势进行展望。

*基金项目: 航天预研项目 (KY-06721)

收稿日期: 2020-03-17 收修改稿日期: 2020-05-02

1 太赫兹光谱探测技术

近二十年, 在太赫兹光谱探测技术研究中, 对太赫兹时域光谱 THz-TDS (Terahertz-time domain spectroscopy) 探测技术的研究最为广泛。THz-TDS 的原理是, 通过测量太赫兹辐射脉冲在物质内部传输后加载的物质吸收系数等光学参数信息, 或测量从物体表面反射的太赫兹辐射脉冲, 获取材料表面和空气介质间的介电常数突变信息, 得到物质的太赫兹光谱特征信息。利用 THz-TDS 技术, 可以得到物质的太赫兹光谱, 目前太赫兹技术的大部分应用都基于此^[13]。1984 年, THz-TDS 技术首先由北美电话电报公司 (AT&T)、Bell 实验室以及 IBM 的 Waston T.J. 研发中心提出并开发^[2]。目前, 太赫兹光谱探测技术, 可以广义地分为低频的微波毫米波太赫兹光谱探测 (最大光谱频率小于 0.1THz) 技术和高频太赫兹光谱探测 (0.1THz~10THz) 技术。低频毫米波太赫兹光谱探测技术主要通过微波辐射激发的技术途径实现。高频太赫兹光谱探测技术目前通常采用光电导激发和非线性光整流效应的技术途径实现。

在微波毫米波太赫兹光谱探测技术方面, 由于太赫兹波频率介于微波和红外之间, 在太赫兹技术的早期研究中, 主要通过微波的激发方法进行改进, 以获得太赫兹波。通过对 LC 震荡回路进行改进获得更高的微波频率, 可以获得频率小于 100GHz 的低频太赫兹波。目前, 常见的太赫兹成像安检仪主要采用 Ka 频段的高频微波实现, 而近期在美国刚完成融资的 RaySecur 太赫兹安检应用^[14]则采用更高频率的毫米波实现。这些微波毫米波太赫兹光谱探测设备具有辐射功率大、穿透能力强的优点, 但是受限于较低的光谱频率范围, 不能有效地获取分子振动和转动能级信息, 无法实现物质光谱特征识别。微波毫米波探测手段对屏蔽物包裹下的物品固液气性态具有较好的探测能力, 并可通过成像的方式实现对物品外观轮廓的描绘; 但其对物品的具体成分以及是否具有危险性无法探测, 限制了其在安检领域的应用。

在高频太赫兹光谱探测技术方面, 2002 年 Auston^[15]利用蓝宝石基辐射损伤的硅 RD-SOS (Radiation-damaged silicon on sapphire) 首次实现光电导探测技术。光电导激发以能带间隙在太赫兹光子能量范围内的光电导半导体材料 (常用的有 GaAs 半导体) 作为太赫兹脉冲辐射的光学天线, 通过超短激光脉冲 (常用的有 800nm 和 1550nm 飞秒激光) 照射激发电子空穴对, 在外加电场作用下, 产生电流强度迅速增加的瞬态漂移电流后, 电子从价带跃迁到导带辐射相干太赫兹脉冲^[16]; 光电导采样以低温生长的 GaAs 半导体和 InP 半导体为天线, 以激发太赫兹光学天线的超短脉冲激光作为采样脉冲照射天线产生自由载流子, 以太赫兹脉冲的电场作为偏转电场, 促使自由载流子运动产生强度随太赫兹电场变化的电流, 对电流探测可拟合出被测太赫兹电场。由于载流子存在时间非常短, 只有在光电导半导体材料上, 超短激光采样脉冲和太赫兹脉冲同时照射时, 探测器中才会产生电流脉冲, 且在探测器中通过的电流大小与瞬态太赫兹电场成正比 (如图 1B 所示)。通过改变太赫兹产生脉冲和光学门之间的延迟就能快速扫描重建整个太赫兹波形, 并由天线直接恢复太赫兹电场^[16]。在高频太赫兹光谱探测技术中, 光电导采样法已经成为太赫兹脉冲探测中常用的方法, 原理如图 1 所示。类似光电导法, 非线性光整流效应法也是由超短激光脉冲照射天线产生自由载流子, 不同的是, 光整流效应法通过非中心对称的晶体材料 (常用的有 ZnTe 晶体) 中发生非线性极化耦合, 将光频耦合至太赫兹频率, 产生太赫兹波^[17]。

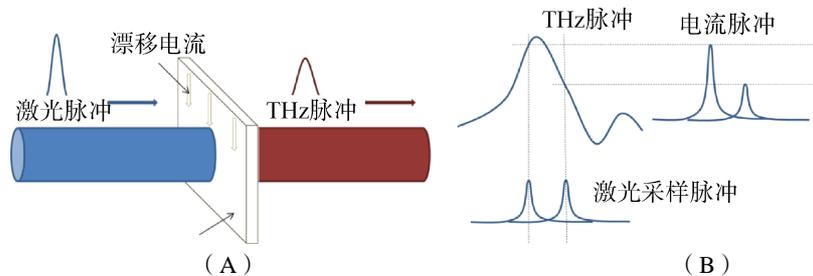


图 1 光电导收发原理

Fig. 1 Photoconductive emitter and sampling principle

由于高频太赫兹光谱范围有效覆盖物质的分子能级跃迁, 且高频太赫兹光谱探测技术的实现方法产

生的是相干太赫兹波，能够同时探测光谱的能量和相位信息，通过反演得到有重要意义的参数，包括物质的折射率和吸收系数等。但目前高频太赫兹光谱探测设备的太赫兹发射功率主要集中在微瓦量级，发射功率较低。

2 太赫兹光谱探测特点

太赫兹与其他频段光谱技术相比具备以下六点特性。

第一，低能量：1THz 电磁辐射的单光子能量只有 4.1meV，远低于各种化学键的键能，不会引起有害的电离，在医学检查和无损检测方面具有广泛的应用前景。

第二，特征指纹性：脉冲太赫兹辐射的频谱范围从几百 GHz 到十几 THz，许多生物大分子的振动和转动能级、以及半导体和超导材料的声子振动能级都落在太赫兹频段，在光谱分析和物质识别等方面具有非常广泛的应用前景。

第三，强穿透性：大部分非极性材料不会明显地吸收太赫兹波，太赫兹波能够以很小的衰减穿透陶瓷、脂肪、布料及塑料等物质，因此，太赫兹波对于这些常用的覆盖材料有非常强的穿透能力，使得太赫兹在公共场所进行安全检查方面具有非常好的应用前景。

第四，瞬态性：脉冲太赫兹辐射的典型时间宽度大约在皮秒或者亚皮秒量级，可以对材料进行超快时间研究。

第五，稳定性：太赫兹时域光谱系统对黑体辐射不敏感，在小于 3THz 范围内信噪比达 $10^4:1$ ，远远高于傅里叶变换红外光谱技术，而且稳定性也更好。

第六，相干性：现在常用的光电导和光整流太赫兹技术获得的太赫兹脉冲的相干长度可以达到 ns 量级，具有很高的时、空相干性，作为近场探针研究超导体等材料的瞬态相干动力学时具有极好的优势^[3]。

3 太赫兹频谱探测技术发展历程与现状

在目前的太赫兹技术研究与应用中，0.1THz~10THz 频段范围的太赫兹技术的成熟度依然处于实验室研究阶段，而应用于工业级和实现产品化的高成熟度的太赫兹探测技术的工作频段主要集中于微波毫米波的低频部分。因此，产学研界广义地将微波毫米波探测技术定义为低频太赫兹探测技术，而将 0.1THz~10THz 频段范围的太赫兹探测技术定义为高频太赫兹探测技术。

3.1 基于微波毫米波的太赫兹探测技术发展历程与现状

2002 年，采用微波毫米波的太赫兹光谱探测技术的太赫兹成像安检设备在美国实现^[18]。在实验室条件下，其采用的微波太赫兹波成功透射了人体衣物，识别出了人体腋下报纸包裹的匕首以及西装下的金属饰物和手枪，该设备的探测结果如图 2 所示。该探测设备验证了微波太赫兹成像探测的可行性，由于微波太赫兹辐射为非有害的电离辐射，且微波太赫兹波发射功率大、穿透能力强，使得微波太赫兹探测技术快速发展并实现商业化。其中由 L3 公司开发的 ProVision3D 太赫兹安检仪采用毫米波发射机制，技术较为成熟，已经在世界上的多个主要机场实现应用。

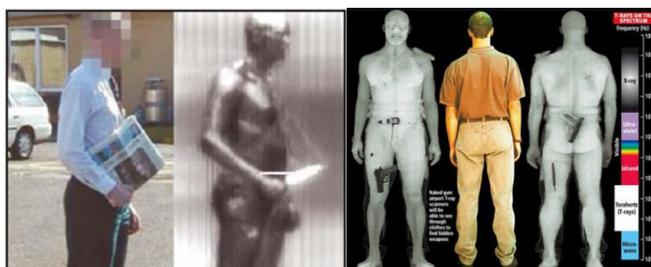


图 2 微波太赫兹探测成像

Fig. 2 Microwave THz detection imaging

由于衣物等包裹物在低频的微波太赫兹下几乎无衰减而人体对太赫兹波强吸收, 在人体安检应用中, 保护个人隐私问题成为困扰微波太赫兹探测技术发展的难题。

针对上述难题, 在微波毫米波太赫兹探测技术研究中, 发展出多种成像隐私保护技术。2013 年, 在上述的 ProVision3D 太赫兹安检仪中, 美国 L3 公司在隐私保护方面采用了人体通用图片代替太赫兹原始探测图片的方式呈现^[19]。2019 年, 美国的 RaySecur 公司通过采用频率更高的毫米波太赫兹探测技术, 提高了人体的太赫兹透射强度, 在成像原图中降低了人体隐私部位成像的可能性及可识别程度。

国内方面, 2010 年北京无线电计量研究所在微波毫米波太赫兹成像探测系统的研制中, 采用了去隐私部位图像的处理算法, 通过识别人体隐私部位并在成像原图中实时引入遮挡的方式, 最大限度地保护人体隐私^[20]。2017 年, 上海微系统所的叶金晶等人^[21]提出了一种个人隐私保护算法, 可以应用于人体毫米波成像安检系统, 而不受被检测人员的体形高低和胖瘦等特征的影响。该算法通过将毫米波太赫兹图像的背景噪声进行弱化, 并采用图像灰度二值化和形态学处理区分背景与人体目标, 根据身高划分的人体部位比例对处理后图像的像素点做遍历求最值法, 实现隐私部位的定位并对原始图像进行不透明遮挡, 可以满足标准站姿下不同身高受检人的隐私部位定位需求。

值得一提的是, 在安检应用领域, 北京遥测技术研究所完成了太赫兹时域光谱安检仪样机的研制, 并在新疆乌鲁木齐南站及深圳福田地铁站完成太赫兹人体安检仪的演示验证, 如图 3 所示, 已经具备批量生产条件。针对微波太赫兹探测技术保护个人隐私的难题, 在 2019 年, 北京遥测技术研究所提出一种解决方法。在人体扫描区设置人体双脚放置标准位, 并采用标准站姿的方式进行成像扫描探测; 采用类似 L3 公司的人体通用图片代替扫描的人体原图的方法, 并设置深度学习网络对设备算法进行训练, 通过大量的数据采集实现对危险品放置位置的识别, 并在人体通用图片中实时显示。该方法可有效识别危险品的藏匿位置并保护个人隐私。

综上所述, 目前国内外微波毫米波太赫兹探测技术已经成熟并实现了商品化。作为一种无电离辐射的安检设备可以安全高效地实现人体扫描安检, 是对 X 光安检仪应用弊端的有效补充。但是由于微波毫米波太赫兹探测采用的太赫兹波频率低于 0.1THz, 未能覆盖物质指纹谱的光谱范围 (0.1THz~10THz), 因此, 在安检应用中无法识别人体随身物品的具体物质成分, 依然需要对物品逐一进行人工检查。

3.2 高频太赫兹探测技术发展历程与现状

2002 年 Auston 首次实现光电导探测技术^[15], 使得高频的太赫兹光谱探测技术成为可能。由于早期用于泵浦高频太赫兹波的飞秒激光产生困难, 且设备昂贵, 限制了光谱太赫兹探测技术的发展。近年来, 归功于光纤飞秒激光器的快速发展, 采用光纤飞秒激光器使太赫兹时域光谱仪的体积、重量以及成本大大降低, 可靠性提高。目前, 基于太赫兹光谱分析的实用化检测装置已经具备了体积小、光谱范围宽、测量速度快、成本低等特点。

近十年, 国际市场上已出现商业化的太赫兹光谱分析系统, 代表性产品有美国 Zomega 公司的 mini-Z 小型化太赫兹时域光谱仪、Picometrix 公司的 T-ray 4000 系统以及英国 TeraView 公司的 TPS spectra 光谱仪等。

2012 年, 英国 TeraView 公司研发设计的 TPS Spectra 3000 太赫兹光谱仪^[22] (如图 4 所示), 成为世界上第一台能够同时进行透射和衰减全反射 ATR (Attenuated total reflection) 测量的商用太赫兹光谱仪。TPS Spectra 3000 基于 TeraView 专有的基于半导体的太赫兹脉冲技术, 可在室内环境条件下运行并提供卓越的分析性能。TPS Spectra 3000 的模块化样品室可接受标准红外采样附件, 用于传输测量。ATR 模块可以提供固体、悬浮液、浆料浆和凝胶的无损测量, 并且可以从 1mg 的固体样品中获得光



图 3 北遥所太赫兹人体安检仪样机
Fig. 3 Demonstration of THz body security apparatus by BRIT

谱信息。TPS Spectra 3000 也可用于研究分子间氢键振动、晶体结构晶格振动或低频内部振动，而无需考虑热效应。

Tholabs 于 2016 年 2 月，研制成功了专为波长 1550nm 左右的激光脉冲运作而设计的全光纤飞秒激光太赫兹光谱仪 TeraSmart Menlo Systems^[23]，如图 5 所示。该光谱仪为高速宽频时域太赫兹光谱测量提供了一键启动式解决方案。它结合了配备 Menlo Systems 最新锁模技术的飞秒光纤激光源，有集成化的光纤耦合光路和可靠的延迟线。



图 4 TPS Spectra 3000 太赫兹光谱仪
Fig. 4 TPS Spectra 3000 THz-TDS



图 5 TeraSmart Menlo Systems 太赫兹光谱仪
Fig. 5 TeraSmart Menlo Systems THz-TDS

综上所述，国外已研制成功的太赫兹时域光谱仪配置参数，见表 1。

我国很早就积极投入到太赫兹相关的技术研究中，并实现了太赫兹时域光谱系统平台的研制。目前，国内太赫兹时域光谱技术还处于样机研制阶段，上海理工大学研究完成了工程化水平很低的产品。同样，天津大学的精密仪器与光电子工程学院太赫兹中心在 2013 年也已研发有太赫兹时域光谱系统 FPcA-II 型 THz-TDS 光谱仪^[24]，采用自由空间传输，传输光路为 8-F 共焦式几何光路，整个系统平置于气浮式的光学平台上^[25]，如图 6 所示。

表 1 国外主要太赫兹时域光谱仪指标

Table 1 Capabilities of main terahertz time domain spectrometer abroad

主要对比指标	TPS Spectra 3000	Menlo Systems 光谱仪
太赫兹源	激光门控光导半导体发射器	激光门控光导半导体发射器
太赫兹探测器	激光门控光导半导体接收器	激光门控光导半导体接收器
激光	钛：蓝宝石超短脉冲激光	1550nm 光纤飞秒激光
光谱范围	0.06THz~3THz ($2\text{cm}^{-1}\sim 100\text{cm}^{-1}$)	>5THz (典型 5.5THz)
动态范围	传输时>0.9THz (30cm^{-1})	>90dB (典型 95dB)
光谱分辨率	0.0075THz (0.25cm^{-1})	<1.2GHz
快速扫描	30Hz, 分辨率 1.2cm^{-1}	50Hz

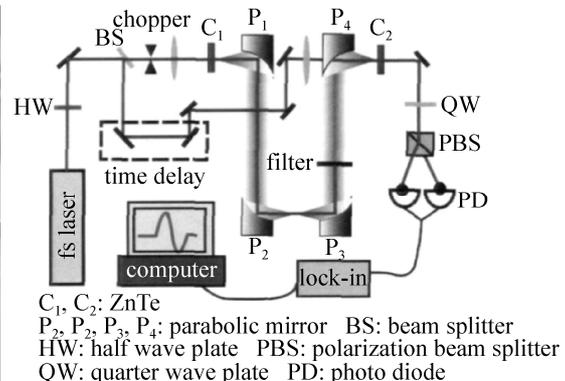
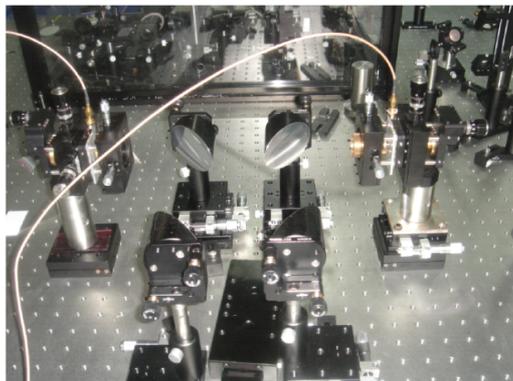


图 6 8-F 太赫兹时域光谱系统光路部分

Fig. 6 8-F Optical path portion of terahertz time-domain spectroscopy system

从 2013 年到 2017 年, 大恒新纪元科技股份有限公司作为牵头单位, 联合首都师范大学等 11 家单位, 获批国家重大科研仪器专项“基于飞秒激光的太赫兹时域光谱仪开发”^[26], 开展了太赫兹时域光谱仪的研制。

高频太赫兹波由于具有可穿透非极性物质且空间分辨率高的特点, 用于无损检测可克服 X 射线穿透性太高而超声波对某些材料又无法穿过的缺点, 成为无损检测中对传统方法的有益补充。利用太赫兹技术可成功探测聚合物内部的气泡及陶瓷中的裂缝^[27]。本世纪初, 美国伦斯勒理工学院研究应用太赫兹技术对航天飞机的绝缘泡沫层进行检测, 使得太赫兹技术被美国航空航天局确定为航天安全检测工具之一^[27]。2011 年, 日本 Hirakawa 等人^[28]利用高频太赫兹探测技术检测了天然橡胶、丁苯橡胶、丁腈橡胶和其他包含炭黑、硫、氧化锌等添加物的橡胶材料的吸收光谱, 证明了太赫兹波可应用于橡胶材料的无损检测。2019 年, 北京食品安全大数据技术重点实验室基于高频太赫兹探测技术对带包装面粉进行了品质的快速无损检测^[29], 验证了采用高频太赫兹探测技术在食品安全领域进行快速无损检测的可行性。

由于受探测器动态范围的限制, 目前高频太赫兹探测技术的光谱范围主要集中在 0.1THz~5THz, 但是依然有效地覆盖了物质指纹谱的光谱范围 (0.1THz~10THz)。目前在太赫兹物质光谱探测分析中, 主要采用的分析方法依然为 Dorney 等人^[30,31]提出的获取材料折射率和吸收系数等光学参数的物理模型。该方法将样品和大气的时域太赫兹信号通过傅里叶平方谱变换得到的样品频谱 $\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)$ 与大气参考信号的频谱 $\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)$ 相比, 得到样品对太赫兹的传输函数 $\tilde{H}(\omega)$, $\tilde{H}(\omega)$ 中包含样品的复折射率 $\tilde{n}(\omega)$ 的信息, 其中 $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - ik(\omega)$, $n(\omega)$ 为实折射率, $k(\omega)$ 为消光系数。在弱吸收近似下 ($k \ll n$),

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{\tilde{E}_{\text{sam}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)} = T(\omega)e^{-i\varphi(\omega)} \quad (1)$$

$$n(\omega) = \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} + 1 \quad (2)$$

$$k(\omega) = \frac{c}{\omega d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{T(\omega)[n(\omega)+1]^2} \right\} \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2k(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{T(\omega)[n(\omega)+1]^2} \right\} \quad (4)$$

式中, ω 为太赫兹波的角频率, c 为光速, $T(\omega)$ 表示样品与大气参考信号振幅模的比, $\varphi(\omega)$ 表示经样品传输后太赫兹波的相位差, $\alpha(\omega)$ 表示样品吸收参数, 通过计算可以得到样品的 $\varphi(\omega)$ 和 $T(\omega)$, 以及折射率 $n(\omega)$ 和吸收参数 $\alpha(\omega)$ 。

基于上述分析方法, 2008 年, Megan R 等人^[32]利用太赫兹反射光谱仪对 10% 质量的糖和聚乙烯混合得到的样品和块状糖进行对比研究, 确定了其反射光谱在小于 0.4THz 范围的一致性和 0.8THz~1THz 范围的差异性; 2009 年, Ruishu F 等人^[33]利用太赫兹时域光谱技术获得了惰性 RDX 和 HMX 单质及 TNPG 盐的样品吸收参数和反射率等光学参数, 通过测量确定了上述混合爆炸物及其单质的吸收峰大略落在 0.82THz 处的相同位置; 2009 年, Brian 等人^[34]利用 mini-Z 太赫兹时域光谱仪对包含食品药品和爆炸物在内的共 8 种物质进行了非接触检测和识别, 验证了在小于 200ms 的实时样品采样时间下, 以实时速率测量和鉴定多种高能化合物的可行性; 2011 年 Gerald 等人^[35]对乙醇、水、肌肉以及新鲜脂肪组织等生物组织分子的光学特性进行了太赫兹光谱技术表征, 并与传统的微波或傅里叶变换远红外光谱方法进行了对比, 通过太赫兹光谱法表征直接获得了组织分子的吸收系数和折射率; 2015 年, David 等人^[36]测量了水蒸气和甲醇的太赫兹光谱参数并与 HITRAN 所列参数的差异进行了讨论, 通过二阶导数分析方法实现了 178 个转变的中心频率和相对强度的识别, 为环境监测和天体物理学领域的研究提供了参考。

国内在 2013 年, 李利龙等人^[37]采用高频太赫兹探测技术对七种植物油及两种调和油进行了太赫兹光谱分析, 并总结出各油脂吸收光谱的特征; 2016 年, 王文爱等人^[38]采用透射太赫兹时域光谱技术在

室温氮气氛围下对 D+右旋葡萄糖进行了光谱分析,确定了无水葡萄糖的 11 个太赫兹特征吸收峰位置为 0.94THz、1.30THz、1.44THz、1.67THz、1.88THz、2.08THz、2.31THz、2.55THz、2.70THz、2.84 THz 和 2.96THz; 2019 年,龙莎等人^[39]在 0.2THz~1.5THz 范围,对真皮革和人工革的太赫兹吸收系数和折射率进行了测量,确定了在 1.0THz 处,真皮革和人工革的吸收系数和折射率的差异,为真假皮革的鉴别提供了重要参考;2019 年,殷贤华等人^[40]利用太赫兹时域光谱技术透射测量得到了 2-巯基苯并噻唑 MBT (橡胶促进剂)和聚乙烯混合物在 0.3THz~1.4THz 的吸收特征谱,并提出一种模型用于对 MBT 有效含量进行定量检测研究。

综上所述,基于 Dorney 等人提出的太赫兹时域光谱分析方法,可以广泛应用在高频太赫兹探测技术中,该方法具有无需执行 Kramers-Kronig 变换分析,直接通过测量振幅和相位信息即可获得样品的复介电常数的优点。

但是,目前高频太赫兹探测技术实现依然停留在实验室阶段。由于空气中含有水蒸气等大量的极性分子会强烈吸收太赫兹波,使得高频太赫兹光谱中出现大量的水气太赫兹特征吸收峰严重影响了物质光谱的探测识别分析,这使得大部分的物质太赫兹光谱识别与分析都被迫在实验室的干燥氮气氛围中进行,同时受泵浦-探针式太赫兹时域光谱技术发射功率限制,漫反射太赫兹光谱动态范围较低,目前物质太赫兹时域光谱探测分析研究的主要途径依然是透射光谱。

因此,在高频太赫兹探测技术的研究中,如何实现一般大气条件下的太赫兹光谱探测并能有效避免大气吸收的干扰,是实现高频太赫兹探测技术实用化的关键技术难点;目前对太赫兹时域光谱进行分析的方法需要准确的相位信息,如何在算法上实现探测样品厚度估计而不用测量,通过迭代收敛得到准确的样品复介电常数信息,是实现高频太赫兹探测技术快速准确地进行物质识别的关键技术难点。

4 太赫兹光谱技术发展趋势

①高频太赫兹光谱探测技术向高功率的方向发展

受光电导及光整流效应实现的泵浦-探针式太赫兹时域光谱技术发射功率限制,且大气对高频太赫兹波具有强吸收性,这严重影响了高频太赫兹光谱探测技术的应用。为实现高频太赫兹探测技术实用化,必须有效地提高高频太赫兹波激发的功率,使时域光谱测量具有大的动态范围。在 2019 年,徐世祥等人^[41]开始对强场太赫兹时域光谱测量技术进行研究。

②太赫兹光谱探测向低频微波毫米波太赫兹与高频太赫兹复合探测的方向发展

高频太赫兹探测技术有效覆盖了物质指纹谱范围,且相关的物质指纹谱特征分析方法已经成熟,可以有效补充低频微波毫米波太赫兹探测技术的不足,但高频太赫兹探测技术受太赫兹发射功率限制,只能进行近距离无接触的局部探测,遍历扫描人体所需时间较长。通过低频的微波毫米波太赫兹探测技术对人体快速扫描成像定位随身物品位置,再采用高频太赫兹光谱探测技术对物品进行局部光谱采样分析可以实现实用化的太赫兹快速无接触安检应用^[42]。

③高频太赫兹光谱探测向太赫兹阵列探测方向发展

受单个高频太赫兹时域光谱系统的发射功率限制,光谱扫描探测视场和面积较小,通过对太赫兹发射器和探测器阵列式布置,可以使高频太赫兹光谱探测技术具有瞬时大视场覆盖探测能力和小型化太赫兹成像系统架构的优势,可以支持大范围区域内动态监测,并可以对多个目标同时跟踪,在目标跟踪和制导等国防领域具有重要应用价值。

④太赫兹光学系统向折射式光学系统发展

过去在太赫兹波段具有良好透射性能的材料非常少,适用于制成太赫兹透镜的光学材料的色散差异小,难以满足成像光学系统设计的需求^[43,44]。近些年太赫兹技术能够快速发展,就是归功于高阻硅(HRFZ-Si)太赫兹折射光学材料的出现^[45]。近年来随着材料科学的发展,TPX、PE 和 PTFE 等太赫兹有机材料被证明在 200 μm ~1000 μm 波长范围,透过率基本一致,可以达到 80%~90%,有效推动了太赫

兹折射光学系统的发展。

5 结束语

太赫兹时域光谱探测技术自 20 世纪 80 年代出现到现在, 国外的研究发展经历了设备庞大的太赫兹透射光谱探测系统到较小体积的固定样品室的太赫兹漫反射光谱探测系统, 最后到目前轻量化手持式太赫兹光谱探测系统的三个阶段。而国内也已经经历了太赫兹透射光谱探测系统到固定样品室的太赫兹漫反射光谱探测系统的两个阶段。可以确定, 轻量化手持式太赫兹光谱探测系统研究正是目前国内外在太赫兹光谱探测系统研究领域的发展趋势。

作为最新的太赫兹技术, 太赫兹时域光谱技术具有独一无二的优点, 近十年来得到相当的发展和运用。最近, 太赫兹时域光谱技术的频率测量范围已经从远红外扩展到近红外。同时, 由于低成本的全光纤飞秒激光器和更先进的太赫兹透射光学系统设计的发展, 以及基于低温生长的 InGaAs 光电导材料等更高效的太赫兹收发天线的出现, 太赫兹时域光谱探测技术的商业工业级应用前景将更加广阔。高性能、实用化、便携性已成为目前太赫兹光谱分析仪器产业化的发展方向。随着更适宜作小型化太赫兹源的、用于太赫兹波泵浦的全光纤飞秒激光器的研究发展以及, 世界各国对太赫兹技术的重视和大力扶持, 相信在不久的将来, 适用于近距离探测的小型化手持式太赫兹光谱探测系统研究将迎来更大的发展。

参考文献

- [1] WALTHER M, PLOCHOCKA P, FISCHER B, et al. Collective vibrational modes in biological molecules investigated by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Biopolymers (Bio-spectroscopy), 2002, 67(45): 310–313.
- [2] 张兴宁, 陈稷, 周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(7): 35–38.
ZHANG Xingning, CHEN Ji, ZHOU Zekui. THz time-domain spectroscopy technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(7): 35–38.
- [3] 卜凡亮, 行鸿彦. 太赫兹光谱技术的应用进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(4): 1–6.
BU Fanliang, XING Hongyan. Progress of terahertz spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(4): 1–6.
- [4] 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 Jianqian. Introduction of THz-wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(6): 703–707.
- [5] ALLIS D G, KORTER T M. Theoretical analysis of the terahertz spectrum of the high explosive PETN[J]. Chemphyschem, 2006, 7(11): 2398–2408.
- [6] BAKER C, LO T, TRIBE W R, et al. Detection of concealed explosives at a distance using terahertz technology[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1559–1565.
- [7] KEMP M C. Explosives detection by terahertz spectroscopy—a bridge too far[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1): 282–292.
- [8] ZHONG H A, REDO Sanchez, ZHANG X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9130–9141.
- [9] HO L, MULLER R, ROMER M, et al. Analysis of sustained-release tablet film coats using terahertz pulsed imaging[J]. Journal of Controlled Release, 2007, 119(3): 253–261.
- [10] SONG Zhengyong, GAO Zhen, ZHANG Youming, et al. Terahertz transparency of optically opaque metallic films[J]. Epl, 2014, 106(2): 27005.
- [11] GAO Lihua, CHENG Qiang, YANG Jing, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science & Application, 2015, 324(4): 1–9.
- [12] 许悦红, 张学迁, 王球, 等. 基于光导微探针的近场/远场可扫描太赫兹光谱技术[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 1–12.
XU Yuehong, ZHANG Xueqian, WANG Qiu, et al. Near-field and far-field scanning terahertz spectroscopy based on photoconductive microprobe[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(3): 1–12.
- [13] 王迎新, 陈志强, 赵自然, 等. 基于太赫兹时域谱分析的爆炸物检测方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 587–590.

- WANG Yingxin, CHEN Zhiqiang, ZHAO Ziran, et al. Study on the method of explosives detection based on terahertz time domain spectroscopy[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(4): 587–590.
- [14] 丁艺璇. 「RaySecur」获得300万美元的种子轮融资,用3D扫描仪核查邮件安全性. (2019-12-09)[2020-03-16]. <https://36kr.com/p/5273476>.
- [15] TANI M, KONO S, MAKOTO N et al. Generation and detection of ultra broadband Terahertz radiation with photoconductive antennas[J]. *IEEE*, 2002.
- [16] ZHANG W, AZAD W A, GRISCHKOWSKY D. Terahertz studies of carrier dynamics and dielectric response of n-type freestanding epitaxial GaN[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(17): 2841–2843.
- [17] HOVHANNISYAN D L, MARGARYAN H L, HAKOBYAN N H, et al. Radiation control in the mid IR wavelength range using the liquid crystal phase grating[J]. *Journal of Contemporary Physics*, 2015, 50(1): 55–63
- [18] CLERY D. Brainstorming their way to an imaging revolution[J]. *Science*, 2002, 297: 761–763.
- [19] TIROSH Y, BIRNHACK M. Naked in front of the machine: does airport scanning violate privacy[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2013, 74(6): 1263–1306.
- [20] 费鹏, 方维海, 温鑫, 等. 用于人员安检的主动毫米波成像技术现状与展望[J]. *微波学报*, 2015, 31(2): 91–96.
FEI Peng, FANG Weihai, WEN Xin, et al. State of art and future prospect of the millimeter wave imaging technique for personnel screening[J]. *Journal of Microwaves*, 2015, 31(2): 91–96
- [21] 叶金晶, 周健, 孙谦晨, 等. 主动毫米波成像隐私保护算法[J]. *红外与毫米波学报*. 2017, 36(4): 505–512.
YE Jinjing, ZHOU Jian, SUN Qianchen, et al. A privacy protection algorithm for active millimeter-wave imaging[J]. *Journal of Infrared Millimeter, Waves*, 2017, 36(4): 505–512.
- [22] TeraView. Determining THz absorption coefficients and refractive indices[R]. TeraView Technical note, TeraView, 2012.
- [23] MenloSystems. MENLO_TeraSmart_datasheet_CN_2018-02_3w[Z]. Germany: TeraSmart, 2018.
- [24] 刘嘉政. FPcA-II型太赫兹时域光谱仪设计及应用[D]. 天津: 天津大学, 2013.
LIU Jiazheng. Designed the FPcA-II THz-TDS through Instrumented impact and application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [25] 田震, 王昌雷, 栗岩锋. 基于光子晶体光纤飞秒激光器的紧凑型太赫兹时域光谱仪[J]. *中国激光*. 2008, 35(3): 1.
TIAN Zhen, WANG Changlei, LI Yanfeng, et al. A compact terahertz time-domain spectrometer based on photonic crystal fiber femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2008, 35(3): 1.
- [26] 宋越. 一款面向教学实验的太赫兹透射成像仪[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SONG Yue. A terahertz transmission imager for teaching experiments[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [27] 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. Terahertz imaging of defects in space shuttle foam insulation[J]. *Physics*, 2003, 32(9): 583–584.
- [28] HIRAKAWA Y, OHNO Y, GONDOH T, et al. Nondestructive evaluation of rubber compounds by terahertz time domain spectroscopy[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(12): 1457–1463.
- [29] 刘翠玲, 徐莹莹, 孙晓荣, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的面粉品质快速无损检测研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 321–325.
LIU Cuiling, XU Yingying, SUN Xiaorong, et al. Study on fast nondestructive testing of flour quality based on terahertz time domain spectroscopy[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(1): 321–325.
- [30] 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*, 2001, 8(7): 1562–1571.
- [31] 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.
- [32] MEGAN R, LEAHY H, MICHAEL J F, et al. Terahertz reflection spectroscopy for the detection of explosives[J]. *Proc. of SPIE*, 6893(5): 1–8.
- [33] FENG Ruishu, LI Weiwei, ZHOU Qingli, et al. Terahertz spectroscopic investigations of explosives and the related compounds[J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 71580w: 1–9.

- [34] SCHULKIN B, CLOUGH B, BRIGADA D, et al. Progress toward handheld THz spectrometry[J]. IEEE, 2009, 978-1-4244-5417.
- [35] GERALD J W, BENNETT L I, THOMAS T, et al. Development of a compact terahertz time-domain spectrometer for the measurement of the optical properties of biological tissues[J]. Journal of Biomedical Optics. 2011, 16(4): 1–10.
- [36] DAVID M S, THOMAS M G, ROBERT H G, et al. Experimental determination of terahertz atmospheric absorption parameters[C]. Proc. of SPIE, 2015, 948300: 1–12.
- [37] 李利龙, 向洋, 吴磊, 等. 几种油脂分子太赫兹谱分析技术的基础研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1566–1568.
LI Lilong, XIANG Yang, WU Lei, et al. Preliminary research on oil analysis by using terahertz time domain spectroscopy[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1566–1568.
- [38] 王文爱, 刘维, 杨茜, 等. 无水葡萄糖的太赫兹时域光谱特性[J]. 中国激光. 2016, 43(11): 1–8.
WANG Wenai, LIU Wei, YANG Qian, et al. Terahertz time domain spectroscopy of anhydrous glucose[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1–8.
- [39] 龙莎, 张华, 宋哲宇, 等. 真皮革和人工革在太赫兹波段的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析. 2019, 39(4): 1030–1035.
LONG Sha, ZHANG Hua, SONG Zheyu, et al. Spectroscopic studies on the natural leather and artificial leather in terahertz band[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2019, 39(4): 1030–1035.
- [40] 殷贤华, 姜燕, 吕斌川, 等. 2-巯基苯并噻唑的太赫兹时域光谱定量研究[J]. 激光技术, 2019, 43(1): 83–87.
YAN Xianhua, JIANG Yan, LV Binchuan, et al. Quantitative analysis of 2-mercaptobenzothiazole based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 83–87.
- [41] 徐世祥, 陆小微, 林庆钢, 等. 强场太赫兹时域光谱测量技术研究进展[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(2): 193–199.
XU Shixiang, LU Xiaowei, LIN Qinggang, et al. Advances in intense terahertz time domain spectrometry[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(2): 193–199.
- [42] PATRIZIA K, MICHAEL S, MARTIN K. Detecting Hazardous Fluids[R]. Philipps University of Marburg: Menlo Systems Inc, 2015.
- [43] 张钊, 孙景旭, 刘则洵, 等. 离轴抛物面镜像面扫描太赫兹光学设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 1–7.
ZHANG Zhao, SUN Jingxu, LIU Zexun, et al. Optical design of THz image surface scanning with an off axis parabolic mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 1–7.
- [44] 魏佳宾, 邓璇. 基于 LabVIEW 的太赫兹扫描成像系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1): 21–26.
WEI Jiabin, DENG Hu. Design of terahertz time-domain spectroscopy scanning imaging system based on LabVIEW[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1): 21–26.
- [45] ZHANG X C, XU J, STEVEN DJ, et al. THz material –Datasheet[R]. highlightoptics: TYDEX, 2011.

[作者简介]

曹恩达 1994 年生, 在读硕士, 主要研究方向为太赫兹时域光谱探测系统设计。

于 勇 1971 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达总体技术、雷达信号处理技术。

宋长波 1979 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达技术与激光大气遥感。

赵一鸣 1983 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达遥感。