

THz 技术在农产品/食品品质检测中的应用

闫战科^{1,2}, 张宏建¹, 应义斌^{2*}

1. 浙江大学信息科学与工程学院, 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 生物图像与生物光电工程实验室, 浙江 杭州 310029

摘要 农产品/食品的质量和品质问题越来越受人们关注。探索实际可行的农产品/食品的无损检测与品质评估技术正在成为研究热点。太赫兹 (THz) 辐射是位于中红外和微波波段之间的一段电磁波, 具有非常重要的科学研究和应用价值。长期以来由于缺乏可行的 THz 波产生方法与探测手段, 该波段相关领域的研究滞缓。THz 光谱传感和成像技术是 THz 波的两个主要应用技术。THz 光谱检测技术作为一种新型检测技术能够获得传统检测无法获得的信息。近十几年来, THz 波用于来研究固、液、气相等各种物质的光电特性、分子内部振动和组成信息, 在生物分析、医疗诊断、安全检测、环境控制等领域, THz 技术显示出广阔的应用前景。文章介绍了 THz 波的主要性质、THz 波检测技术的特点, 论述了 THz 技术在农产品、食品质量与品质检测中的最新进展及其应用的潜力。

关键词 太赫兹辐射; 太赫兹光谱; 太赫兹成像; 食品检测

中图分类号: O434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)11-2228-07

引言

THz 辐射是指波长在 0.03 ~ 3 mm, 频率在 0.1 ~ 10 THz, 典型中心频率为 1 THz 的电磁波, 位于微波和红外波段之间。长期以来由于缺乏有效的产生和探测手段, THz 波科学技术发展滞缓。近十几年来, 随着超快激光及其相关技术的迅速发展, 连续可调的 THz 脉冲波的产生已经不再困难, THz 波段应用技术在生物、医疗、环境、农业等领域的研究也在逐步展开。国际科技界公认, THz 波段是一个非常重要的尚未开发的前沿领域。2004 年 2 月, 美国技术评论期刊公布了未来影响世界的十大关键技术, THz 科学技术位列第五。2005 年 11 月, 我国以“太赫兹科学技术的新发展”为主题召开了第 270 次香山科学会议, 会议指出, “太赫兹和纳米科技同样重要, 一定会对人类的生活带来很大的影响, 对国民经济发展将带来重要的推动作用”。

THz 波段光子的电磁能量大约在 1 ~ 10 meV, 正好和分子转动能级之间跃迁的能量大致相当。分子之间弱的相互作用(如 DNA 氢键的延伸)、核酸大分子的骨架振动(构型弯曲)、偶极子的旋转和振动跃迁以及晶体中晶格的低频振动吸收频率都对应 THz 波段范围。大多数极性分子如水分子、

氨分子等对 THz 辐射有强烈的吸收, 许多有机大分子(DNA、蛋白质等)的振动能级和转动能级之间的跃迁也正好在 THz 波段范围。物质的 THz 光谱(包括发射、反射和透射光谱)包含有丰富的物理质和化学信息, 研究光谱的吸收和色散特性可以用来做化学物/生物样品的探测和识别^[1-4]。和 X 射线相比, THz 光子能量极低(比 X 射线的光子弱 $10^7 \sim 10^8$ 倍), THz 辐射不会在生物组织中引起光损伤及光化电离, 因此特别适合于对生物组织进行活体检查^[5]。和无线电波相似, THz 波能够穿透大多数干的介电材料(塑料、陶瓷、衣物、纸箱、木材、脂肪、骨头、冰、各种粉末、干的食物, 等等), THz 透视技术能获得比 X 射线技术更好的对比度^[6,7]。和光波一样, THz 波能够在空气中传播, 也被金属、固态物体、人体等反射。由于这些独特的性质, 在化学物/生物物质检测、无标记基因检测、食品无损检测、农产品分析和质量控制等方面, THz 波检测技术已经显示出巨大的优势^[8-10]。

在农产品和食品的分析研究中, 光谱分析和成像技术是两个不可缺少的重要手段。如可见-荧光光谱、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、紫外吸收光谱、X 射线成像分析等, 涉及的波段几乎覆盖整个电磁波谱。相对于红外波段, THz 辐射的优势在于, 其波长比红外波段长, 因而物体的散射比红外波

收稿日期: 2006-08-06, 修订日期: 2006-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(30671197, 60774054), 国家科技支撑计划课题(2006BAD11A12)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”基金项目(NCET-04-0524)资助

作者简介: 闫战科, 1983 年生, 浙江大学信息科学与工程学院博士研究生 *通讯联系人 e-mail: ybying@zju.edu.cn

段要小,有利于物体成像;THz 辐射能透射大多数非极性物体,而只有极少的物体对红外辐射是透明的。利用 THz 波光谱的独特性质,对农产品或食品进行 THz 成像和光谱分析,有可能获得其他方法不易获得的信息。THz 光谱和成像技术作为一种新型的快速、无损、低廉的检测技术,有可能成为红外、X 射线等检测分析的互补技术,在农产品/食品检测领域获得广泛应用。

1 太赫兹光谱检测技术简介

THz 光谱技术可以用来研究材料的远红外性质与频率的关系,以用来分析检测材料的属性。目前已经有很多方法可以得到材料的 THz 光谱。传统的傅里叶变换光谱(FTS)是最常见的用来研究分子化合物的技术,这种技术的优点是适用的光谱波段很宽,从 THz 到红外波段都可以用来研究材料的光谱性质,缺点是光谱分辨率有限。为了提高分辨率,窄波段光谱技术采用可调的 THz 光源或探测器,直接测量特定波段的样品光谱^[11]。THz 时域光谱技术是最新发展起来的 THz 技术。该技术利用宽波段的 THz 脉冲,相比 FTS 和窄波段技术有其独特优点。以下分别对 THz 时域光谱技术和成像技术做简单介绍。

1.1 THz 时域光谱技术(THz-TDS)

典型的 THz-TDS 实验系统主要是由超快脉冲激光器、THz 发射元件、THz 探测器件和时间延迟控制系统组成。THz-TDS 工作原理是,产生一束受控的 THz 电磁波,照射被测样品并与之发生作用,在时域内直接测量该 THz 脉冲电场的变化。具体做法是,将超快激光脉冲分成两束,其中一束用于激发 THz 脉冲,另一束用于探测 THz 脉冲的瞬时电场振幅,通过扫描探测激光和 THz 脉冲的相对时间延迟,可得到 THz 脉冲电场强度随时间变化的波形,即测量样品的时域光谱。THz-TDS 系统分为透射型和反射型,即材料的透射式测量和反射式测量,可以根据不同样品的特征和测试要求采取不同的探测方式。图 1 是 THz-TDS 成像系统的一个示意图,该系统基于反射成像原理^[12]。系统包括飞秒激光器、光程延迟机构、THz 发射器和接收器、校准机构等。样品的入射 THz 光束共焦距约为 1 cm。

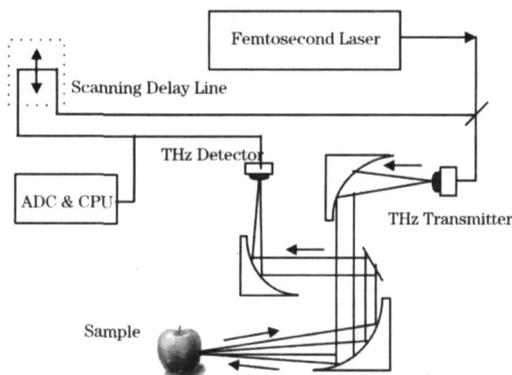


Fig 1 Schematic of a THz-TDS system used for reflection imaging

传统的光学方法仅能测量某一频率光的强度,而 THz 时域光谱技术不同,它直接测量 THz 波的时域电场。时域数据的傅里叶变换能给出 THz 波的大小和相位。因此,无需使用克拉莫-克罗尼格色散关系,就可以提供介电函数的实部和虚部。这使得测量与 THz 波相互作用的介质折射率和吸收系数变得更精确^[13]。基于光源的相干产生机制,THz-TDS 有很高的灵敏度,同时它覆盖的频谱范围也很宽。

各种液态和气态分子的许多转动和振动光谱处在太赫兹频段,而且这些分子在太赫兹段的独特共振可以用来鉴定分子的结构特征^[14]。和拉曼光谱测量频段的晶格振动来获得“指纹”特征相似,THz 波时域光谱通过介电函数的实部和虚部来描述分子的转动和振动光谱。这种测量目前用其他光学或微波方法是不可能实现的。THz-TDS 技术对气体、液体、固体和液晶态物质进行大量光谱测量研究发现,凝聚态物质的声子频率、大分子的振动光谱均在 THz 波段有很多特征峰,液体中的载流子对 THz 辐射也有非常灵敏的响应^[15]。

1.2 THz 成像技术

脉冲 THz 成像,又称“T-ray 成像”,最初是由 Hu 等实现的^[16],该技术已经被广泛应用于各种领域,尤其在非接触式测量、无损检测上显示出独特优势。THz 成像不仅能象 X 光成像那样生成物体的空间密度分布图像,而且能够提供 THz 频段的光谱信息,这也是 THz 光谱的独特性质和 THz 辐射的透射性质所决定的。生物样品在 THz 波段特有的振动和转动光谱响应是光学、X 射线和核磁共振成像所缺少的。其基本原理是利用成像系统把成像样品的透射谱或反射谱所记录的信息(包括振幅和相位信息的二维信息)进行处理和分析,得到样品的 THz 图像。THz 成像系统与 THz-TDS 系统相比,多了图像处理及扫描控制装置。

THz 成像优点之一在于其对相位敏感,这一点意味着可以实现材料鉴定和成分测量。由于不同材料有不同的折射率,利用 THz 的相位信息,可以对物体进行三维立体成像,做到材料内部缺陷、质地的辨别^[17]。同时,和 X 射线成像相比,THz 成像能达到比 X 射线成像更高的对比度^[18],而且是无损成像。利用水对 THz 辐射强吸收性质,可以用来测量物质中的水分含量,如对包装袋内的食品通过测量其水分以获得新鲜程度。通过对肉制品的 THz 检测发现,瘦肉对 THz 辐射吸收很强,而脂肪几乎不吸收 THz 辐射,利用此特性可以对肉制品进行质检^[19],用于食品工业的质量控制。基于干涉和非电离的特性,THz 成像有可能在活体安全医学成像、农产品无损检测(比如种子的质量评估、品种的鉴别、水果内部品质检测)等领域成为一种有力的工具^[20-22]。

THz 成像方法目前主要有时域脉冲 THz 成像(TPI)和连续 THz 波(CW)成像^[23]。相对于时域脉冲 THz 成像(TPI),连续波成像的好处在于能获得高的对比度,而且成像系统简单廉价,便于小型化。目前连续波 THz 辐射主要用量子级联太赫兹激光器产生。为了使测量获得大的动态范围和高的空间分辨率,就需要采用 TPI 成像。TPI 成像系统复杂,其好处在于能够获得更多有用的信息。随着 THz 产生探测设备和传导设备的发展,TPI 成像系统在将来会逐步小型

化。图 2 所示是一个已经商业化的光纤传导的脉冲 TPI 成像系统^[24]。

THz 波相干层析成像技术^[25] (T-CT) 可以获得被测物在 THz 波段的复折射率的三维分布, 因此可以探测材料三维结构的信息, 在无损检测领域有广阔应用前景。

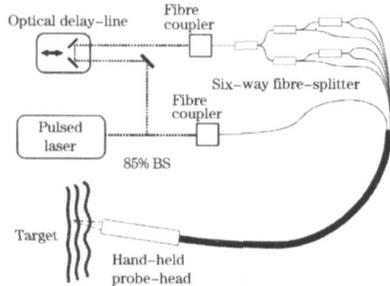


Fig 2 Schematic of a multi-channel fiber-fed pulsed THz system

2 太赫兹技术在农产品、食品品质检测上的应用

世界上许多研究小组在开展农产品与食品的内部品质评估和质量检测技术研究。基于光学的探测技术由于可以做到检测的无损, 从近红外 (NIR) 到 X 射线, 这些区域的研究有大量报道^[26-29]。特别是近红外光与水果等农产品相互作用后, 其光谱与样品的糖度、酸度、硬度和成熟度等信息密切相关, 可以用于农产品品质的无损监测。但目前的研究仍处于实验室阶段, 问题的关键在于发展简单有效的检测方法。THz 光谱和成像技术作为一种新型的检测手段, 其对生物分子、水、非极性物体等独特的作用形式, 有可能使得该技术在农产品与食品质量检测领域取得突破。

2.1 农产品品质无损检测与生产质量控制

目前农产品/食品的品质检测主要靠目测和品尝方法进行, 而内部组成成分则依靠破坏性检验方法, 发展快速、准确和无损的农产品品质检测方法是当务之急。THz 光谱无损检测技术是建立在生物样品在 THz 波段独特的光谱性质基础之上的。特别是由于水对 THz 波段有非常高的吸收系数 (在 1 THz 约 230 cm^{-1} , 为可见光的 105 倍)^[30], THz 波对水分含量非常敏感。农作物在成熟和储藏阶段, 水分的蒸发对其新鲜度和表面光泽有很大影响, 目前尚没有合适的农产品表面湿度变化检测技术。由于 THz 电磁波对水极其敏感, 以及相对近红外和可见光波段小的散射效应, 使得水分测量和基于微小水分差异的其他检测在该波段成为可能。检测方法有透射、反射、漫反射时域光谱分析和 THz 成像技术。

2.1.1 农产品与食品含水量分析

水分测量对农产品和食品处理工业是非常需要的, 但目前还没有有效的监测方法。由于水在太赫兹波段有非常明显的分子间振动 (氢键的拉伸和弯曲), 水对太赫兹辐射有非常强的吸收。利用太赫兹波的自由空间传播特性和能穿透非金属材料, 低散射、低侵入、对极性水分子强吸收的性质,

太赫兹光谱可用于高灵敏探测物体的微小含水量。

THz 波用于植物组织湿度的测量最早的报道是 Hu 等在 1995 年对一个普通树叶分别在新鲜时和 48 h 后进行的 THz 成像, 通过叶片不同部位对入射 THz 波的吸收强弱, 透射光束的强度大小与图像的色深大小成比例, 从图像上可以清晰看到叶片内部水分的分布和含量的大小。放置 2 d 后的叶子由于水分蒸发, 其对 THz 波的吸收大大减弱, 进一步证实了该波段电磁波对水分子的敏感性。随后有研究人员尝试利用该方法对植株内部的水分运输进行观测, 其潜在应用有植物学研究, 农作物的灌溉管理等方面^[31]。

水分的高灵敏测量是干燥食品质量控制的重要一环。Ogawa^[32]等利用毫米波 (低频 THz 波段) 吸收特性研究干态食品的水分含量和冷冻度, 实验建立了植物和食物中的水分含量和冷冻度监测系统。利用水和冰在低频 THz 波段的吸收性质, 可以做到水分的适时监测。实验发现芝麻和树叶的吸收性质和它们的水分含量直接成比例。而且根据水和冰的不同系数, 可以用来鉴别和监测水和冷冻食品等的冷冻度。

奶粉、速溶咖啡等粉末中过多的水分会使咖啡口味变淡并且结块。Takeshi^[33]等在低频 THz 波段 (约 0.3 THz) 采用 TDS 方法进行非接触式精确测量脱水食品 (速溶咖啡) 的含水量。系统工作在透射模式, 之所以选择低频段, 是由于水对 THz 波高频段有强的吸收, 通常限制了其测量应用对象只能是薄的或相当干的样品, 而 THz 低频段水的吸收相对较小, 尽管在该波段也有衰减, 但还是可以检测到信号。咖啡粉末置于玻璃瓶中, 由于玻璃基本不吸收 THz 辐射, 低散射咖啡粉末也几乎不衰减 THz 波, 因此可以做到瓶内水分含量的精密测量。实验的检测限达到 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ (系统信噪比是 780)。他们研究了水分的厚度和 THz 吸收光谱的关系, 以及如何改进水分测量的灵敏度。如图 3 所示, 实验结果表明了在 THz 波段高灵敏水分测量的潜力。

Stefan^[34]等在 THz 波段 (0.2 ~ 2 THz) 做了油中水分和灰尘的鉴定研究, 分别对不同油种建立了不同的稀释模型, 实验发现对极性油种利用 THz-TDS 可以测量油中掺杂的含水量, 而在无机油里面水滴的散射效应非常明显。

2.1.2 内部品质检测与质量控制

利用 THz 波对肉制品中的瘦肉与脂肪穿透能力不同这一特性, 可以对肉制品进行质检。生物组织的 THz 成像研究近年来报道比较多, 主要集中于成像方法的研究。Ferguson^[35]等利用 THz 辐射啁啾成像技术对多种生物组织识别分类。他们采用太赫兹电场采样技术对猪肉、鸡肉、牛肉等脂肪组织时域透射成像。与采用近红外脉冲成像相比, 由于散射小, 太赫兹采样获得的图像对比度有较大的增强。Seongsin^[36]等首次用 QCL 产生连续 THz 波进行生物组织成像, 基于水/脂肪吸收特性的不同获得了较高的图像对比度。通过观察透射 THz 波的强度, 可以非常清晰地分辨新鲜的动物脂肪、肌肉、肌腱、骨头、内脏等的图像, 并且能够获得各自的吸收系数。

基于 THz 技术的水果内部品质无损监测研究也在展开, Ogawa^[37]等建立了基于 THz 波反射光谱的番茄内部品质检测系统, 研究内部受损番茄和正常番茄的不同光谱特征。他

们首先采用 THz-TDS 方法对番茄表皮的折射率进行了测量计算, 得出折射率在 1 THz 时约为 1.8 (见图 4)。实验建立了另一套检测装置, 该系统采用后向振荡器 (BWO) 作为 THz 源, 用于产生连续线性的 1 THz 探测光束, 光束聚焦照射在样品检测点上, 经表面反射后通过调制聚焦在热电探测器上, 后经信号锁相放大输入计算机处理。该系统根据番茄表皮层湿度的差异来对其内部品质进行无损检测。如图 5 所示, 实验发现果肉内部损坏部位和正常部位的反射、折射系数差异非常明显, 该实验结果证明了此检测方法的可行性。而且这种检测目前用可见光或近红外技术是很难实现的。同时还采用 THz-TDS 方法对糖溶液的复折射率进行了测量。结果表明糖分浓度和 THz 波系数吸收成反比关系, 并且复折射率的实部基本不发生变化。该实验结果对于开展水果等的内部品质无损检测有一定借鉴意义。

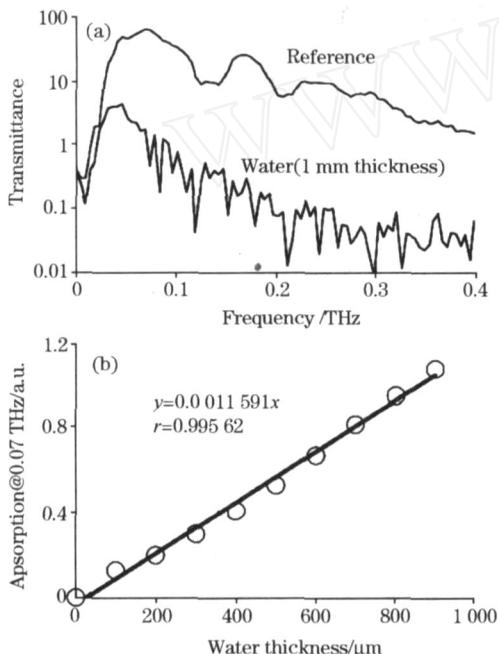


Fig 3 (a) THz transmission spectra with and without 1 mm thick water layer and; (b) relationship between water thickness and THz absorption at 0.07 THz

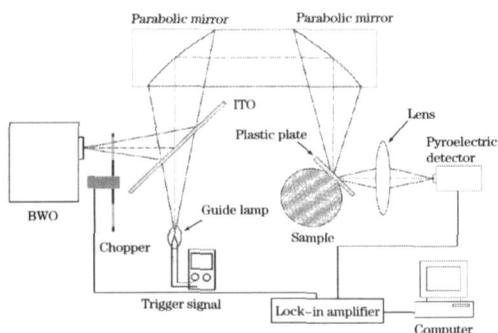


Fig 4 Schematic diagram of a 1THz reflection system

率的空间分辨测量, 对包装袋内产品进行质量控制。图 6 展示了一个装有谷物的箱子的 THz 透射成像^[21]。纸板箱对 THz 辐射几乎是透明的。图像中的黑暗区域是混杂在谷物中的葡萄干, 由于其高含水量和周围谷物形成明显对比。在这幅图像里面, 样品的厚度 (约为 5 cm) 比 THz 束的共焦参数 (约 1 cm) 要大, 葡萄干也没有处在 THz 束的焦点上, 导致葡萄干图像要比实际的大。这种影响其实可以通过选择合适的成像系统来避免。该成像技术特别适用于包装袋内食品的检测, 只要包装材料对 THz 波来说是透明的, 比如纸箱、大多数塑料、干的薄木板等。

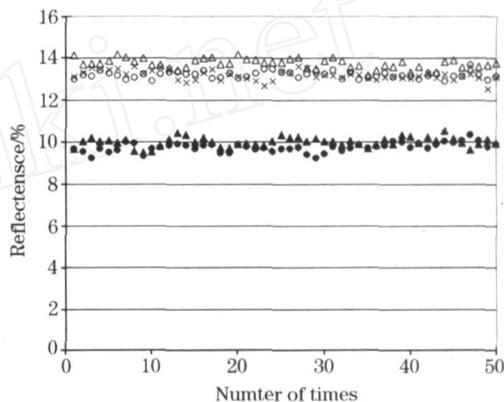


Fig 5 An experimental result of the reflectance measurement of the sample tomato. White dots show damaged points and black dots show normal points. Each point was measured 50 times to compensate for the fluctuation of the experimental system

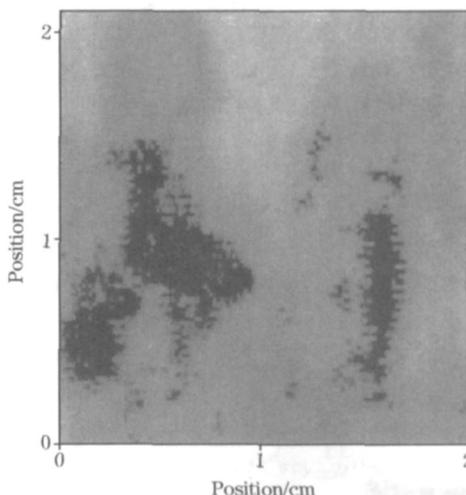


Fig 6 THz transmission image of 2 cm square portion of a small box of breakfast cereal. The false color scale is related to the transmitted THz amplitude. The dark regions are raisins, which exhibit a high contrast relative to the surrounding material due to their high water content

THz 技术另一个最重要的应用是, 基于物体太赫兹透射

Rutz^[38]等报道了用太赫兹光谱做样品混合物的均一性

检测的实验,他们用 THz-TDS 系统对样品微小区域成像,图像显现出微粒很大的非均一性。Morita^[39]等建立了 THz 波段塑料密封袋内产品微缺陷适时探测系统。系统原理是依据 THz 波段塑料和水的吸收系数的不同以及水与空气折射系数的巨大差异。研究人员把充水和充气的通道装配的被测物包埋在聚乙烯膜里面,缺陷直径在 10~100 μm,用太赫兹波束聚焦扫描包装袋密封的区域,探测透射信号。系统探测限取决于信号转换速度。与以前的方法相比,比如可见光和超声波技术,该方法优点是可以穿透光学上不透明的物体,并且探测物体不需要配液的沉浸。该方法有可能发展成为一种探测塑料包装袋内产品缺陷的新方法,在实际生产线的在线检测上获得应用。

2.2 种子鉴定与识别

目前基于 THz 技术的农作物种子的鉴定和识别研究刚刚展开,孙金海^[40]等采用 THz-TDS 技术在 0.2~2.5 THz 波段研究了一些典型玉米种子的 DNA 样品,实验发现虽然不同样品在 THz 波段有不同的吸收特性,但其时域光谱并没有发现特征吸收峰,不能利用“指纹特征谱”进行识别;逯美红^[41]等在前面的基础上采用 THz 成像技术成功对玉米种子进行识别,成像方法是对样品切片进行透射式逐点扫描成像,再利用空间图像成分分析方法进行计算。结果表明基于 THz 成像技术的空间图样分析方法不仅能探测到物体的存在,而且还能确定物体的种类,即利用这种方法能很好地实现鉴定和识别。而且在 THz 波段,只要不同样品的吸收谱上存在一点细微的差别,这种成分分析方法即可实现对不同样品的探测和识别,所以可以将其应用到在测量波段不存在明显的特征吸收峰的样品的鉴别上。THz 成像技术作为一种新兴的鉴别手段有可能有效的弥补传统的特征吸收峰鉴别方法的不足,在其他领域也获得应用。

2.3 其他方面的应用

利用 THz 频率段生物分子的指纹谱特征,可以用来检测生物分子,鉴别细菌孢子和有毒化合物。小生物样品的 THz 谱显示出典型的特征共振性质,而且对分子结构的微小区别非常敏感^[42-45]。THz 光谱成像技术是其主要方法之一。如对密封袋内毒品(如 MDMA,脱氧麻黄碱,海洛因等)和爆炸物(如 RDX, TNT, HMX, C-4 等)的探测和识别^[46-49];DNA 等生物大分子的构象研究和 THz 生物芯片的无标记基因识别^[50-52];苯甲酸及其衍生物葡萄糖及尿酸 DNA 和牛血清蛋白视黄醛异构体 DNA 碱基等的研究^[53-57]。THz-TDS 对分子结构,同分异构体和晶体构造的细小变化有高度敏感性。葛敏^[58,59]等利用 THz-TDS 技术对 D-木糖、D-核糖、D-阿拉伯糖、D-来苏糖及相关的五元糖和苯甲酸及其衍生物进行测量,发现不同糖类化合物和苯甲酸及其单甲基取代物的吸收谱表现出明显的特征,表明 THz-TDS 对化合物结构非常灵敏,可以应用于物质检测与分析。Bernd^[60]等利用 THz 吸收光谱来识别阿司匹林、乳糖、蔗糖、酒石酸等粉末,获得了很高信噪比。通过适当计算,这种方法也可以用来测定

化学物的浓度^[61,62]。

THz 谱差异可以用来测量纳米量级的生物分子。Br Ündermann^[63]等研究液体和水样品,得到了干的乳白蛋白滴成像和核苷酸鸟嘌呤波膜的 THz 光谱。实验发现水解乳清蛋白浓度越小,对 THz 波吸收越小。实验检测限浓度达到 3 nmol/pixel(600 ng/pixel)。在 THz 光谱范围内不需要标记或着色这些分子就可以获得较灵敏的探测。THz 光子的低能量使得非电离、非破坏式生物分子观察和探测成为可能。

利用细菌孢子在 THz 波段存在“指纹”谱可以进行细菌的探测和鉴定。关于细菌识别的研究, Globus^[64-66]等研究了大肠杆菌(*E. coli*)稀溶液 DNA 的 THz 特征,测量了聚乙烯(PE)丸和稀释水溶液中枯草芽孢杆菌(BG)细胞和孢子的共振光谱。Bykhovski^[67,68]等为了分析 DNA 和转运 RNA 对整个细胞 THz 光谱的作用,在 10~25 cm⁻¹波段测定了 *E. coli* 和 BG 的 THz 透射光谱。在实验中他们发现细胞和孢子的染色体 DNA 光谱特征和相应的细胞/孢子,特别是孢子特征基本相关。可见 DNA 对整个细胞/孢子光谱有着重要作用,通过对遗传物质的 THz 光谱建模,可以用来分析和解释实验中 THz 光谱特征的许多重要的性质,帮助对有害细菌和细胞的识别。

3 总结与展望

到目前为止,基于 THz 波段的光谱分析和成像技术的研究虽然还在起步阶段,但取得的研究结果表明,THz 技术应用于农产品、食品质量检测领域很有其独特的优势,相信在农业和食品研究领域会有越来越多的用武之地。与其他电磁波段已经相对成熟的光谱技术相比,THz 光谱技术仍需要大量的基础研究工作,比如 THz 光谱和分子振动光谱特征的研究,化合物和生物样品等的光谱图库和指纹图库的建立等。只有找出光谱的特征,才有助于 THz 光谱和成像技术在质量控制、化合物识别和生物医学等方面获得广泛的应用。目前的应用技术研究中有很多不明原因和障碍,比如,在同类水果的内部品质检测实验中发现,不同样品有不同的反射系数,初步猜测果肉的湿度不同是主要因素,但真正原因并不清楚。对食品含水量的分析,生物组织或细胞等高含水量的物体,若要采用透射测量目前只能用薄层样品或相当干的样品来检测,这通常限制了其测量应用对象和范围。温度对 THz 光谱的影响也非常显著^[69],在不同温度下 THz 时域谱中包含的信息不完全相同,在研究中需要注意温度的影响。尽管有困难,THz 光谱技术在研究生物分子、生物材料、化合物性质等方面已经显示出其独特之处。在完全弄明白生物材料和 THz 波的相互作用之前,很多研究仍在继续,这些最初的结果已经提供了极具说服力的实例。随着 THz 科学基础研究和相关技术的快速发展,THz 技术在不久的将来必将会在生物、农业与食品、医疗、环境控制等领域获得推广应用。

参 考 文 献

- [1] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(11): 1011.
- [2] Gilad Haran, Wei-Dong Sun, Klass Wynne, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, 274: 365.
- [3] Nahata A, Auston D H, Heinz T F. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(12): 150.
- [4] WANG Xiao-hong, ZHANG Liang-liang, HU Ying, et al(王晓红, 张亮亮, 胡颖, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(3): 385.
- [5] Hu B B, Darrow J T, Zhang X C, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(10): 886.
- [6] Verghese S, McIntosh K A, Brown E R. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1997, 45: 1301.
- [7] Woolard D L, Brown R, Pepper M. et al. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93, 10: 1722.
- [8] Cheville R A, Grischkowsky D. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(14): 1960.
- [9] Cheville R A, Grischkowsky D. *Opt. Lett.*, 1995, 20(15): 1647.
- [10] Mittleman D M, Jacobson R H, Neelamani R, et al. *Appl. Phys. B, Lasers Optics*, 1998, 67: 379.
- [11] Han P Y, Tani M, Usami M, et al. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(4): 2357.
- [12] Daniel M Mittleman, Rune H Jacobsen, Martin C Nuss. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1996, 32: 686.
- [13] Ciesla C M, Arnone D D, Corchia A, et al. *Biomed. Appl. Ultrafast Lasers*, 2000, 3934: 73.
- [14] Walther M, Plochocka P, Fischer B, et al. *Biopolymers*, 2002, 67(4-5): 310.
- [15] Okumura K, Tanimura Y. *Chem. Phys. Lett.*, 1998, 295(4): 302.
- [16] Hu B B, Nuss M C. *Opt. Lett.*, 1995, 20(16): 1716.
- [17] Mittleman D M, Hunsche S, Boivin L, et al. *Opt. Lett.*, 1997, 22(12): 904.
- [18] Timothy D Dorney, William W S, Richard G B, et al. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, 19(7): 1433.
- [19] Wang S, Ferguson B, Abbott D, et al. *J. Bio. Phys.* 2003, 29: 247.
- [20] Wu Q, Hewitt T D, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(8): 1026.
- [21] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, et al. *Appl. Phys. B*, 1999, 68: 1085.
- [22] Han P, Cho G, Zhang X C. *Opt. Lett.*, 2000, 25: 242.
- [23] Nicholas K, Hua Zhong, Xu J Z, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20: S294.
- [24] Michael C Kemp, Antony Glauser, Colin Baker. *Proc. of SPIE*, 2006, 6212: 2.
- [25] Lien K Nguyen, Michael L Johns, Lynn F Gladden. *Optics Express*, 2006, 14(6): 2123.
- [26] LIU Yan-de, YING Yi-bin, FU Xia-ping(刘燕德, 应义斌, 傅霞萍). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(11): 1793.
- [27] YING Yi-bin, LIU Yan-de, FU Xia-ping(应义斌, 刘燕德, 傅霞萍). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(1): 63.
- [28] Ying Y B, Liu Y D. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(1): 65.
- [29] Abbott A J, Lu R, Upchurch L B, et al. *Hortic. Rev.*, 1997, 20: 1.
- [30] Kindt J T, Schmuttenmaer C A. *J. Phys. Chem.*, 1996, 100, 10373.
- [31] Hadjiloucas S, Karatzas L S, Brown J W. *IEEE Trans., Microwave Theory Tech.*, 1999, 47: 142.
- [32] Ogawa Y, Shindo K, Mizuno M, et al. *Astronomy, Atmospheric and Environmental Science*, 2004, Joint 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics. 451.
- [33] Takeshi Yasui, Tsutomu Araki. *Proc. of SPIE*, 2005, 6024, 6024(A): 1.
- [34] Stefan Gorenflo, Ulrike Tauer, Iliyana Hinkov, et al. *Proc. of SPIE*, 2006, 6194(7): 1.
- [35] Ferguson B, Wang S, Gray D, et al. *Microelectronics Journal*, 2002, 33(12): 1043.
- [36] Seongsin M Kim, Fariba Hatam, Allison W. Kurian, et al. *Proc. of SPIE*, 2005, 6010(1): 1.
- [37] Yuchi Ogawa, Shin Ichiro Hayashi, Naoshi Kondo, et al. 2006, American Society of Agricultural and Biological Engineer(ASABE) Paper, 2006, No. 063050, 4.
- [38] Frank Rutz, Martin Koch, Shilpa Khare, et al. *Proc. of SPIE*, 2005, 5727: 115.
- [39] Morita Y, Dobroiu A, Otani C, et al. *Journal of Food Protection*, 2005, 68(4): 834.
- [40] SUN Jin-hai, SHEN Jing-ling, GUO Jing-lun, et al(孙金海, 沈京玲, 郭景伦, 等). *J. of Maize Sci. (玉米科学)*, 2006, 14: 26.
- [41] LU Mei-hong, SHEN Jing-ling, GUO Jing-lun, et al(逯美红, 沈京玲, 郭景伦, 等). *Optical Technique(光学技术)*, 2006, 32(3): 362.
- [42] Walther M, Plochocka P, Fischer B, et al. *Biopolymers(Biospectroscopy)*, 2002, 67: 310.
- [43] Walther M, Fischer B M, Jepsen P U. *Chem. Phys.*, 2003, 288: 263.
- [44] Fischer B, Walther M, Jepsen P U. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47: 3807.
- [45] Nishizawa J, Sasaki T, Suto K, et al. *Optics Communications*, 2005, 246: 239.
- [46] Zhang X C. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47: 3667.

- [47] Upadhyaya P C, Shen Y C, Davies A G, et al. *J. of Biol. Phys.*, 2003, 29: 117.
- [48] Kodo Kawase, Yuichi Ogawa, Yuuki Watanabe, et al. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2549.
- [49] Stewing F, Kleine-Ostmann T, Koch M. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 41(2): 79.
- [50] Fischer B, Hoffmann M, Helm H, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20: S246.
- [51] Kodo Kawase. *Optics & Photonics*, 2004, 15: 34.
- [52] Abdellah Menikh, Samuel P Mickan, Haibo Liu, et al. *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, 20: 658.
- [53] Walther M, Plochocka P, Fischer B, et al. *Biopolymers*, 2002, 67(4-5): 310.
- [54] Walther M, Fischer B M, Jepsen P U. *Chem. Phys.*, 2003, 288(2-3): 261.
- [55] Markelz A G, Roitberg A, Heilwei E J. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, 320(1-2): 43.
- [56] Walther M, Fischer B, Schall M, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, 332(3-4): 390.
- [57] Fischer B M, Walther M, Jepsen P U. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47(21): 3808.
- [58] GE Min, ZHAO Hong-wei, JI Te, et al(葛敏, 赵红卫, 吉特, 等). *Science in China, B(中国科学 B 辑)*, 2005, 35(6): 445.
- [59] GE Min, ZHAO Hong-wei, JI Te, et al(葛敏, 赵红卫, 吉特, 等). *Nuclear Techniques(核技术)*, 2004, 27(7): 546.
- [60] Bernd M Fischerab, Hanspeter Helma, Peter Uhd Jepsenc. *Proc. of SPIE*, 2006, 6038, 6038(9): 12.
- [61] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2554.
- [62] Watanabe Y, Kawase K, Ikari T, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83: 800.
- [63] Erik Br ündermann, Martina Havenith. *Proc. of SPIE*, 2006, 6194(6): 6.
- [64] Globus T, Khromova T, Gelmont B, et al. *Proc. of SPIE*, 2006, 6093(8): 3.
- [65] Globus T, Woolard D. *Int. J. of High Speed Electronics and Systems*, 2003, 13: 904.
- [66] Brown E R, Khromova T B, Globus T, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(5): 1076.
- [67] Alexei Bykhovski, Xiaowei Li, Tatyana Khromova, et al. *Proc. of SPIE*, 2005, 5995(N): 8.
- [68] Alexei Bykhovski, Tatiana G, Tatyana K, et al. *Proc. of SPIE*, 2006, 6212(H): 1.
- [69] Shen Y C, Upadhyaya P C, Linfield E H, et al. *Vibrational Spectroscopy*, 2004, 35: 113.

Research Progress of Terahertz Wave Technology in Quality Measurement of Food and Agricultural Products

YAN Zhan-ke^{1,2}, ZHANG Hong-jian¹, YING Yi-bin^{2*}

1. National Lab of Industrial Control Technology, Department of Info Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. Lab of Bio-image and Bio-optoelectronic Engineering, Department of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

Abstract The quality concern of food and agricultural products has become more and more significant. The related technologies for nondestructive measurement or quality control of food products have been the focus of many researches. Terahertz (THz) radiation, or THz wave, the least explored region of the spectrum, is the electromagnetic wave that lies between mid-infrared and microwave radiation, which has very important research and application values. THz spectroscopy and THz imaging technique are the two main applications of THz wave. During the past decade, THz waves have been used to characterize the electronic, vibrational and compositional properties of solid, liquid and gas phase materials. Recently, THz technology has gained a lot of attention of researchers in various fields from biological spectral analysis to bio-medical imaging due to its unique features compared with microwave and optical waves. In the present paper, the properties of THz wave and its uniqueness in sensing and imaging applications were discussed. The most recent researches on THz technology used in food quality control and agricultural products inspection were summarized. The prospect of this novel technology in agriculture and food industry was also discussed.

Keywords Terahertz wave; THz spectroscopy; THz imaging; Food quality measurement

(Received Aug. 6, 2006; accepted Nov. 8, 2006)

*Corresponding author