

文章编号:1001-7380(2015)05-0050-04

太赫兹光谱技术在林业研究中的应用

孙海军^{1,2}, 徐 莉¹, 蒋 玲^{3*}, 宣 艳¹, 高步红¹, 杜丽婷¹, 唐 颖¹, 闵辉华¹

(1. 南京林业大学现代分析测试中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 南京林业大学信息科学技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要:综述了太赫兹(THz)光谱技术在林产品品质鉴定、木材加工业及林木生理研究等林业科学相关方向的最新研究成果,并展望了THz光谱技术及其与其他技术相结合在林木种质、种苗质量检测、森林病虫害预警及珍贵名木鉴定与分类等领域中的拓展应用。

关键词:太赫兹光谱;林业研究;品质;病虫害

中图分类号:S712;TH744.41 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2015.05.014

Application of terahertz spectroscopy technique in forestry research

SUN Hai-jun^{1,2}, XU Li¹, JIANG Ling^{3*}, XUAN Yan¹, GAO Bu-hong¹, DU Li-ting¹,
TANG Ying¹, MIN Hui-hua¹

(1. Advanced Analysis and Testing Center, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In this paper, we reviewed the application progress of terahertz (THz) spectroscopy technology in the research related to forestry science, i. e. quality identification of forestry products, wood-processing industry and physiology of forest tree. And we also suggested the potential application of THz technology on quality detection of tree germplasm and germchit, prewarning of forest diseases and insect pests, and identification and classification of precious trees.

Key words: THz spectroscopy; Forestry research; Quality; Diseases and insect pests

太赫兹(THz)波是指频率在0.1~10 THz(波长为3 000~30 μm)范围内的电磁波(1 THz = 10^{12} Hz)。其长波段方向与毫米波(亚毫米波)相重合,短波方向与红外线相重合^[1]。该波段的光谱包含丰富的物理和化学信息,因为许多分子间或分子内的弱相互作用、偶极子的旋转与振动跃迁及核酸大分子的骨架振动等都与THz波频率相对应,其光谱和成像技术可以提供微波、红外等光谱技术所不能提供的信息^[2]。研究THz波与物质的相互作用一般采用里得伯原子模型^[3],其基本原理是利用飞秒脉冲产生THz电场,通过傅立叶变换获得被测物品

的光谱信息,进而通过特征频率对物质结构进行分析和鉴定。THz光谱技术还可以成像,即将样品的透射谱与反射谱所记录的信息(包括振幅和相位的二维信息)进行处理和分析,从而获得样品的THz图像。

THz光谱技术之所以引起研究者的兴趣,重要的原因是其具有透视性、安全性、空间分辨率高、指纹谱性等独有的性质^[4-6]。由于生物分子的振动、转动跃迁能级落在THz频段,且THz波能量低,对生物分子来说属于安全射线,不会造成生物分子的

收稿日期:2015-07-13;修回日期:2015-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目“基于松木叶绿素太赫兹指纹谱的松材线虫病监测研究”(31200541);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:孙海军(1987-),男,山东潍坊人,实验师,博士,研究方向:光谱学仪器应用与技术研发。E-mail:ww018150@163.com。

***通信作者:**蒋 玲(1978-),女,副教授,博士,主要从事太赫兹光谱学研究工作。E-mail:lingjiang616@hotmail.com。

结构与活性破坏,因此 THz 技术广泛应用于无损检测领域。水分子为极性分子,对 THz 波吸收强烈^[7]。此外,THz 波光谱技术还可以用来鉴别和区分有机分子的不同构型和构象^[8]。这些性质使得 THz 光谱技术在林业科学研究领域具有广泛应用前景。基于 THz 光谱技术的理论基础和其独有性质,并结合林业科学研究特点,本文综述了 THz 光谱技术在林产品品质鉴定、木材加工业及林木生理等方面的研究进展,并展望了 THz 光谱技术应用于林木种质、种苗无损检测及与其他技术结合检测森林病虫害入侵及珍贵名木等方面的应用。

1 THz 光谱技术在林产品品质鉴定中的应用

核桃、橙子、植物油等林产品富含人体必需的微量元素,具有很高的营养价值,因此对林产品品质(如是否有病虫害、农药残留等)的无损检测至关重要。李斌等^[9]利用 THz 光谱对水等极性分子的强吸收特性,初步进行了山核桃虫害检测。结果表明:与无虫害山核桃切片相比,由于活体害虫含水量较高,感染虫害的山核桃切片具有明显的 THz 光谱吸收。该研究表明 THz 光谱技术在检测山核桃内部虫害方面具有较好的应用潜力。戚淑叶等^[10]同样以山核桃为研究对象,探讨了 THz 光谱技术应用于山核桃变质情况及壳厚测量等的研究,分别从山核桃的物理、化学指标的 THz 光谱响应特征差异入手,实现了核桃品质的无损检测,并将其应用于山核桃无损分级。此外,植物油的脂类有机大分子对 THz 辐射具有特异性吸收,具备在 THz 波段的识别基础,可通过 THz 技术进行鉴别和定性分析^[11]。李建蕊等^[12]利用 THz 光谱技术研究了山茶油、麻油与橄榄油在 0.3 ~ 1.5 THz 波段的吸收特性,然后利用迭代算法计算,获得其折射率和吸收系数。该研究成果为植物油的成分分析及质量评价提供了依据。

在食品安全必须严重关注的今天,快速、准确、可靠的农药检测及成分识别具有重要的意义。THz 光谱技术具有能量低、频谱宽等优点,近年来在农药检测方面的应用越来越多。王强等^[13]对橙子、香蕉和苹果 3 种水果及其与杀菌剂噻菌灵农药的混合样品进行了 THz 光谱测试,获得了其在 0.2 ~ 1.5 THz 波段的折射率和吸收谱图。结果表明,THz 吸收谱中吸收峰的位置和幅值与样品种类和农药含量不同显著相关。以 3 种水果样品的 THz 吸收光谱的一阶导数作为特征分类数据,用主成分分析方法进行

鉴别,样品分类鉴别正确率达 100%。此外,谢正文等^[14]利用 THz 光谱技术检测获得橙子和多菌灵混合样品在 0.3 ~ 1.5 THz 波段的吸收谱,利用多元线性回归技术对混合物吸收光谱进行分析,可以计算出混合物中多菌灵的含量。

樟脑是一种理想的防虫、防蛀、防霉与防腐剂,已广泛应用于衣物、标本、档案与图书等的贮存保护。天然樟脑是从樟树的枝桠、木片、根部、樟叶等部位提取和从樟油中提炼制得,而劣质的樟脑丸都不同程度地掺有对二氯苯和萘,其危害不言而喻。朱守明等^[15]采用 THz 光谱技术分析了樟脑、对二氯苯和萘 3 种防蛀剂及其混合物的光学性质及光谱特性,根据其折射率和吸收谱,从新的角度了解它们的结构特点,从而使判断樟脑丸的质量优劣成为可能。这也为进一步利用 THz 时域光谱技术来研究林产品与其他有机化工产品之间的弱相互作用提供了理论与试验依据。

2 THz 光谱技术在木材工业中的应用

木材是一种非极性的非金属材料,在光学频段是不透明的,但其在 THz 波段是透明的。利用 THz 波的透视性及空间分辨率高的优势,通过分析 THz 脉冲透过木材前后光谱特性的变化或通过 THz 成像可以实现木材的无损检测。水分对 THz 波有较大吸收率,水扩散到裂缝中,木材的纤维结构与节子会明显地显示出来,因此采用 THz 波断层成像技术可以判断木材内部是否腐朽、空洞以及木节子的分布情况,但对其内部微小缺陷无法检测^[16]。岳楨干^[17]利用 THz 成像系统实现了木材密度与厚度的无损检测。张旭等^[18]采用改进的 THz 光谱系统,基于应力光学定律,利用 THz 波技术有望实现对木材等材料内部应力的探测。此外,马欣然等^[19]综合介绍了 THz 光谱技术在木材光学特性、含水率测定及木结构内部隐藏缺陷的无损检测等方向的系列研究成果。

目前利用 THz 光谱技术进行木材光学特性的研究主要包括 THz 波与木材介质的相互作用机理,THz 波在木材中的传播特性与木材组织的吸收系数、散射系数和双折射等。加拿大 Alberta 大学以云杉为例,利用 THz 光谱技术测量其双折射特性,实现了对木制品内纤维取向的测定^[20]。德国 Koch 等^[21]利用 THz 成像技术建立了山毛榉亚年轮空间分辨率的密度图,根据投射数据和重量体积法得到的数据,通过线性拟合校正,得到密度(n)和吸收率

(αd)之间的关系: $n=0.145\text{ g/cm}^3 \times \alpha d$ 。利用这个关系,可以直接将 THz 投射图像转换为木材样品的密度图。Jackson 等^[22]也通过 THz 成像技术,实现了木材年轮的分析。UNBC(北英属哥伦比亚大学)的物理学家 Reid 等^[23]基于 THz 波可以检测木材内部的纤维素构造,通过 THz 波透视木材,认为在伐木时即可观察到原木中被甲虫等破坏的地方,从而减少木材加工过程中的时间与成本。

THz 光谱技术还可以作为木质素检测的工具之一。木质素广泛存在于木材体内,其结构十分复杂。目前对于木质素的生物活性与结构、功能之间的关系还不是十分清楚。因此加强对木质素结构的研究,具有重要的理论意义和现实意义。THz 光谱具有瞬态性的特点,而且 THz 脉冲的典型脉宽在 Ps 级,利用 THz 射线检测木质素,会大大提高时间和空间分辨率,可以实现对组织内的木质素进行微损或无损探测^[24]。

3 THz 光谱技术在林木生理研究中的应用

THz 射线与 X-射线等相比,具有低能性的优点,利用 THz 射线探测生物组织不会导致细胞损伤。因此,THz 射线可以作为一种探针,研究生物体内部物质的化学、生物成分与波谱特性等信息。特别是 THz 波对水分吸收敏感,因此可以表征树叶等生物组织的水分、叶绿素的含量和分布,据此推断生物体或组织的生物活性。

首先,利用 THz 光谱技术可以查看植物体内水分的分布和运输去向,了解树叶内部水分含量及不同时段的变化,观测植物根茎水分动态的变化^[25]。Hadjiloucas 等^[26]利用 THz 辐射技术研究了叶片水分在 0.1 ~ 0.5 THz 频段之间的频谱,获得了不同叶片的水分含量情况及影响因素,并实现了对不同水分含量的叶片的分类。Hu 等^[27]分别对新鲜树叶和采摘 48 h 后树叶进行 THz 成像,根据树叶不同部位对入射 THz 波的吸收强弱变化,透射光束的强度与图像的色深成比例,利用 THz 图像观测叶片内水分含量与分布。Jeong 等^[28]利用银杏叶片的 THz 电子激光成像获得的图像与可见光透射图像进行对比,结果表明 2 种成像方法的区别主要源自水在 2 种频率光下吸收系数的不同。古树名木多是树龄较大的过熟林木,生长势衰弱,并均有不同程度的损伤。张艳洁^[29]研究发现,THz 透过率及水分蒸发量均与树龄成反比,树龄越大银杏叶片水分的蒸发速

率越低。结合电镜成像技术,该研究还成功地将 THz 成像技术用于不同树龄的古树叶片成像分析,为古树衰弱诊断等提供了新的方法。

其次,官能团的 THz 光谱特性研究也是 THz 技术的一个重要方向,具有重要的学术与应用价值^[30]。叶绿素是一种镁卟啉大分子杂环化合物,刘一客等^[31]观测了不同棕树叶的叶绿素及类胡萝卜素的 THz 指纹谱峰,发现 3 种棕树叶的 THz 吸收峰均主要出现在低波数 30 ~ 170 cm^{-1} 范围,并鉴定了 THz 指纹谱峰。在棕树叶的主要化学成分中,叶绿素的 THz 响应强于类胡萝卜素。李春^[32]利用 THz 光谱仪和傅里叶变换红外光谱仪研究了叶绿素样品的 THz 光谱,并采用密度泛函 DFT 理论计算了叶绿素分子的 THz 吸收谱,在稳定构型的基础上得到其频率振动光谱,并将其与试验光谱进行了比对。这些研究方法可以作为植物光学研究及 THz 光谱研究的新方法,有助于科研工作者更加深入地了解植物的相关生理行为及生长状况等。

4 研究展望

将 THz 光谱技术应用于林木种质、种苗质量的无损、快速检测。生物大分子的振动和转动频率位于 THz 波段。不同质量的林木种质、种苗的碳水化合物、蛋白质等含量不同,在 THz 波段范围内的相应吸收特性也不同。运用 THz 探测林木种质、种苗,使其与内部大分子产生共振,在特定的频率处出现吸收峰,从而区别不同质量的林木种质、种苗。该技术在农业种质(如小麦、玉米、棉花等)检测领域已成熟运用^[33-35]。

将 THz 光谱技术与遥感技术等结合,可应用于森林病虫害入侵预警等研究领域。中国森林病虫害共有 8 000 种以上,面积大发生,危害极为严重。遥感技术是一种先进的空间信息获取技术,在森林病虫害监测及预警方面具有优势,将其与受害林木实测光谱相结合研究具有重要意义^[36-37]。利用不同受害类型及不同受害程度林木的叶绿素和水分含量不同而导致 THz 波段反射率的差异及变化特征^[37-39],可以为应用遥感技术研究森林资源松材线虫病等入侵及动态变化过程提供试验依据。

将 THz 光谱技术与红外光谱等技术互为补充,应用于珍贵名木如酸枝、紫檀与黄花梨木等的鉴定与分类。通过探究不同名木的红外、THz 频段的特征谱图,并构建数据库,应用于木材质量控制与检测。

参考文献:

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展 [J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [2] 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 51-56.
- [3] 常胜利, 王晓峰, 邵铮铮. 太赫兹光谱技术原理及其应用 [J]. 国防科技, 2015, 36(2): 17-22.
- [4] 牧凯军, 张振伟, 张存林. 太赫兹科学与技术 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 14(3): 221-230.
- [5] 张婷婷. 太赫兹时域光谱技术在农业和材料中的应用基础研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 13-15.
- [6] 汪一帆, 尉万聪, 周凤娟, 等. 太赫兹 (THz) 光谱在生物大分子研究中的应用 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2010, 37(5): 484-489.
- [7] 李向军, 杨晓杰, 刘建军. 基于反射式太赫兹时域谱的水太赫兹光学参数测量与误差分析 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(1): 135-140.
- [8] 曹丙花, 侯迪波, 颜志刚, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的农药残留检测方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 429-432.
- [9] 李斌, WANG Ning, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害检测初步研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(50): 1196-1200.
- [10] 戚淑叶, 张振伟, 赵昆, 等. 太赫兹时域光谱无损检测核桃品质的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3390-3393.
- [11] 李利龙, 向洋, 吴磊, 等. 几种油脂分子太赫兹光谱分析技术的基础研究 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1566-1568.
- [12] 李建蕊, 李久生. 植物油的太赫兹时域谱分析 [J]. 中国粮油学报, 2010, 25(3): 112-114.
- [13] 王强, 王孝伟, 马治浩. 基于 THz 时域光谱技术的水果杀菌剂农药检测与鉴别 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(8): 3080-3084.
- [14] 谢正文, 王强, 马治浩. 基于太赫兹时域光谱的橙子和多菌灵成分的定量研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2198-2201.
- [15] 朱守明, 田璐, 赵昆, 等. 用太赫兹时域光谱技术对防虫防蛀剂进行质量检测 [J]. 现代科学仪器, 2011, (2): 81-84.
- [16] Schad K C, Schmoldt D L, Ross R J. Nondestructive Methods for Detecting Defects in Softwood Logs, FPL-RP-546 [R]. Madison, WI: USDA Forest Service, 1996: 1-13.
- [17] 岳桢干. 用于检测材料密度/厚度的太赫兹成像仪 [J]. 红外, 2010, 31(11): 47-48.
- [18] 张旭, 王世斌, 李林安, 等. 基于太赫兹光谱的平面应力测量方法 [J]. 实验力学, 2015, 30(1): 17-22.
- [19] 马欣然, 王阿川, 李佳. 太赫兹波谱技术在木材工业中的应用 [J]. 木材加工机械, 2015, 26(1): 55-58.
- [20] Reid M, Fedosejevs R. Terahertz birefringence and attenuation properties of wood and paper [J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2766-2772.
- [21] Koch M, Hunsche S, Schuacher P, et al. THz-imaging, a new method for density mapping of wood [J]. Wood Science and Technology, 1998, 32(6): 421-427.
- [22] Jackson J B, Mourou M, Labaune J, et al. Terahertz pulse imaging for tree-ring analysis: a preliminary study for dendrochronology applications [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(7): 190-190.
- [23] Reid M E, Hartley I D, Todoruk T M. Terahertz applications in the wood products industry [M] // Saeedkia D. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd, 2013: 547-578.
- [24] 苏同福. 烟梗木质素与纤维素的分离及太赫兹图谱研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2008.
- [25] 江世亮, 邱德青, 王禹. 太赫兹: 又一场“前沿革命”——该技术“空白领域”渐成热门, 将极大地改变人类生活 [J]. 世界科学, 2006(10): 17-20.
- [26] Hadjiloucas S, Karatzas L S, Bowen J W, et al. Measurements of leaf water content using terahertz radiation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1999, 47(2): 142-149.
- [27] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [28] Jeong Y U, Cha H J, Park S H, et al. THz imaging by a wide-band compact FEL [C] // Proceeding of the 2004 FEL Conference, 26th International Free Electron Laser Conference and 11th FEL User Workshop. Trieste, Italy, 2004: 667-670.
- [29] 张艳洁. 古银杏和古槐衰弱特性的研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [30] 马春前, 许向东, 邹蕊娇, 等. 有机官能团的太赫兹光谱特征研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 870-874.
- [31] 刘一客, 刘禹彤, 许向东, 等. 棕榈叶的形貌、成分及光谱特性研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(6): 390-397.
- [32] 李春. 基于太赫兹光谱技术和 DFT 理论的生物分子研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2014: 4.
- [33] 葛宏义, 蒋玉英, 廉飞宇, 等. 小麦品质的太赫兹波段光学与光谱特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 2897-2900.
- [34] 逯美红, 沈京玲, 郭景伦, 等. 太赫兹成像技术对玉米种子的鉴定和识别 [J]. 光学技术, 2006, 32(3): 361-363.
- [35] 涂闪, 张文涛, 熊显名, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的转基因棉花种子主成分特性分析 [J]. 光子学报, 2015, 44(4): 6.
- [36] 王震, 张晓丽, 安树杰. 松材线虫病危害的马尾松林木光谱特征分析 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 367-370.
- [37] Jiang L, Li C, Huang L, et al. Infection trace of pine wilt disease based on terahertz spectroscopic technology [J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2014, 6(5): 578-582.
- [38] Jiang L, Li C, Huang L, et al. Investigation of terahertz spectral signatures of DNA of Pine Wood Nematode [J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2012, 4(6): 426.
- [39] Liu Y F, Tan J J, Jiang L, et al. Diagnostic technique of pine wood nematode disease based on THz spectrum [C] // Yao J Q, Liu S G, Zhang X C. Photonics and Optoelectronics Meetings 2008: Terahertz Science and Technology. Wuhan, China: International Society for Optical Engineering, 2009(7277): 1-5.