

Research in Moisture and Hydration Detection by Terahertz Time Domain Spectroscopy

Liping Liu^{1*}, Yufei Wang¹, Yazhou Zhang¹, Fei Yang², Maojiang Song²

¹School of Food and Drug Manufacturing Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang Guizhou

²Guizhou Institute of Metrology, Guiyang Guizhou

Email: liuliping@git.edu.cn

Received: Jan. 11th, 2018; accepted: Jan. 25th, 2018; published: Feb. 5th, 2018

Abstract

The terahertz (THz) radiation occupies a large portion of the electromagnetic spectrum between the microwave and infrared bands. It refers to the frequency between the 0.1 THz to 10 THz (the wavelength is 3 mm to 30 μm). Since it possesses many attractively characteristic properties, THz imaging and sensing technologies can provide information not available through conventional methods such as microwave and X-ray techniques. THz waves contain rich information involved in molecular vibration and rotation, and have sub-picoseconds pulse width, low photon energy, and high space-time coherence. Combined with the terahertz imaging systems of transmission type and reflection type, a general review of its application in medical applications, forestry products, agriculture/food products by using THz time domain scan-imaging technology is provided. The achievements and the problems to be solved are also discussed. We also reviewed the water structure and interaction in the solution detected by terahertz time spectroscopy and conducted the research of our study.

Keywords

Terahertz, Spectroscopy, Moisture Imaging, Moisture Detection, Water Interaction

太赫兹光谱技术检测水分及水合作用的研究进展

刘丽萍^{1*}, 王煜斐¹, 张亚洲¹, 杨 霏², 宋茂江²

¹贵州理工学院, 食品药品制造工程学院, 贵州 贵阳

*通讯作者。

文章引用: 刘丽萍, 王煜斐, 张亚洲, 杨霏, 宋茂江. 太赫兹光谱技术检测水分及水合作用的研究进展[J]. 分析化学进展, 2018, 8(1): 1-10. DOI: [10.12677/aac.2018.81001](https://doi.org/10.12677/aac.2018.81001)

²贵州省计量测试院, 贵州 贵阳
Email: liuliping@git.edu.cn

收稿日期: 2018年1月11日; 录用日期: 2018年1月25日; 发布日期: 2018年2月5日

摘要

太赫兹(Terahertz, THz)辐射, 通常指的是频率在0.1 THz~10 THz (波长在3 mm~30 μm)之间的电磁波, 该波段在微波和红外之间, 属于远红外和亚毫米波范畴。同X射线、可见光等电磁辐射一样, 可作为物体成像的光源, 其成像和光谱技术可以提供微波和X射线技术所不能提供的信息。太赫兹波脉冲宽度在亚皮秒量级, 光子能量和高时空相干性, 包含分子转动和振动信息。本文总结了太赫兹成像技术在水分检测和水分成像中的应用, 综述了太赫兹成像在医疗、林业、农业和食品中的应用、取得的成果和亟待解决的问题。同时综述了太赫兹时域光谱技术在水合作用检测中的应用, 提出本实验室的研究进展。

关键词

太赫兹, 时域光谱, 水分成像, 水分检测, 水合作用

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹(Terahertz, THz)是一种介于远红外和微波之间的波段, 其频率范围在 0.3 THz~10 THz 之间。太赫兹波具有很好的穿透能力, 尤其是对于大多数非透明的电介质材料, 具有良好的穿透性, 包括纸、塑料、陶瓷、纤维、晶体和混凝土等。由于大量有机分子转动和振动跃迁均在太赫兹范围内, 所以炸药、毒品、病毒等危险物质在太赫兹波段存在特征吸收峰, 可用于物质识别和结构表征。这些特性使得太赫兹实时成像技术分辨率高, 成像对比度和均匀性好, 所以在基础研究、工业、军事、生物及医学等领域都具有巨大的应用潜力[1] [2]。有机物质的太赫兹光谱的指纹特征使得利用脉冲式太赫兹源进行成像鉴别物质成分成为可能。太赫兹辐射不容易穿透金属或极性液体, 如水, 使得 THz 的应用在一些领域具有局限性。但是 THz 成像技术用于检测物质的湿度和水分是 THz 波又一重要的研究领域, 水分成像检测在林业、食品加工工业等领域具有重要意义。

太赫兹成像技术最早产生于上世纪九十年代, 可分为相干成像和非相干成像, 在很多领域具有十分重要的科研价值和广泛的应用远景[3] [4] [5] [6]。与常规的成像技术相比, 如可见光成像、微波遥感成像、红外成像, 以及 X 射线成像等, 太赫兹成像技术最显著的区别在于, 上述成像技术只能依靠样品的强度信息进行二维成像, 而太赫兹波样品成像过程中, 可以同时实现振幅和相位成像, 具有更高的分辨率, 可以实现对更小目标的探测及成像, 具有更好的穿透能力。诸多研究结果均表明, 太赫兹辐射能量很低(约为 4.1 meV), 不会引起生物组织的光致电离, 适合于生物医学成像, 因此可作为一种新型的无损探伤、安全检测和医学检查手段[7] [8] [9] [10] [11], 这将弥补 X 射线检测及其他检测技术的缺陷, 所以太赫兹透射和反射图像成为 X 射线或红外线成像的互补技术手段。在太赫兹波段内, 大多数吸收水分的材料对

太赫兹几乎是透明的(如纸),或部分透明(如塑料)。因此,在这些物质中水分的分布会有一个明显的“湿”区域和“干”区域的图像对比,同样可以用于其他液体的扩散与检测,只要液体的介电常数高于材料。

2. 太赫兹成像基本原理

太赫兹时域光谱系统中增加图像处理装置和扫描控制装置构成一个基本的太赫兹成像系统[3]。根据成像样品及成像系统的性质,可以利用反射扫描或透射扫描进行成像。太赫兹辐射成像的基本原理:利用已知波形的太赫兹波作为成像射线,其透过成像样品或从样品反射的太赫兹辐射返回的强度和相位信息将包含了样品复介电常数的空间分布[12],将所得透射的太赫兹辐射的强度和相位的二维信息记录,并经过适当的光谱数据处理和频谱分析,就能得到样品的太赫兹电磁波三维图像。在所得图像中,每一像源对应一个太赫兹时域谱,所以太赫兹波成像技术的一个显著特点就是信息量非常大。然后通过样品信号的时域谱进行傅里叶变换,即可得到每一个点的太赫兹频率响应谱。根据太赫兹波的辐射方式,可将太赫兹成像技术分为以下几类:脉冲太赫兹成像和连续波太赫兹成像;根据成像系统结构可以分为:透射式太赫兹成像和反射式太赫兹成像;根据成像方式可以分为:太赫兹扫描成像、太赫兹实时成像,以及太赫兹单次成像;根据应用类型可以分为:太赫兹光谱成像、太赫兹层析成像、太赫兹近场成像、太赫兹偏振成像,及太赫兹差分成像。

目前,太赫兹时域光谱成像是太赫兹成像技术中应用最广泛、技术最成熟的。太赫兹时域光谱成像系统的基本原理就是在 THz-TDS 系统中,在二维扫描平移台上放置样品,使得样品在垂直于太赫兹波传输方向的 $x-y$ 平面移动,从而使太赫兹波透过样品的不同点,记录每个像素点的透射和反射信息。太赫兹时域光谱成像结合了太赫兹光谱与成像技术的特点,最终获得的每个图像的像素点同时包含被成像样品的振幅信息和相位信息,由此可以重构样品的空间密度分布、厚度分布、折射率分布、以及吸收系数分布等信息,对样品的二维光学信息进行精确提取。其方法特点在于分辨率高,信噪比高。但是一些不可避免的问题存在于太赫兹时域光谱扫描成像技术:第一,THz-TDS 所产生的太赫兹波能量非常小,所以要求光谱具有较大的动态范围;第二,由于需要对样品上的每个位置分别进行扫描,非常耗时,限制此技术的实际应用;第三,THz-TDS 成像技术是对样品每个局部区域进行扫描测量,无法很好的体现样品的整体光学特性,并不适用于动态变化的信息测量。

在逐点扫描成像系统中,太赫兹波在样品处的焦斑尺寸决定了太赫兹成像的空间分辨率。若将太赫兹波近似视为高斯光束,则焦斑尺寸可以表示为[13]:

$$R = \sqrt{2(4\lambda/\pi)(f/d)} \quad (1)$$

其中, d 是经过第一个抛物镜后,准直的太赫兹光束的光斑尺寸, f 为第二个抛物面镜的焦距, λ 为宽带太赫兹波谱中的峰值频率对应的波长。根据上述公式可知,焦斑尺寸越小,则系统分辨率越高。可见产生高频的脉冲信号可以提高成像系统的分辨率。在实际的实验系统中,通常通过测定太赫兹焦点处太赫兹脉冲信号的空间尺寸标定成像系统的空间分辨率[14]。光电导天线由于受载流子寿命的影响,辐射出的波频率较低,降低成像系统的分辨率,成像效果较差。

太赫兹可用于水分成像主要就是利用液态水的高介电常数。例如,一些材料在 1 THz 时典型的折射率和吸收系数:木材[15]折射率约 1.3,吸收系数约 15 cm^{-1} ,叶子[16]的折射率约为 1.7,吸收系数为 40 cm^{-1} ,聚酰胺塑料[17]的折射率约为 1.75,吸收系数为 10 cm^{-1} ,软木塞[18]的折射率约为 1.2,吸收系数约为 10 cm^{-1} ,都小于水的折射率约为 2,吸收系数约为 230 cm^{-1} 。通过太赫兹测量水的复介电常数,最终得到水在太赫兹范围内的介电谱。通过测量含水材料的有效介电常数,得到其水分分布及扩散的性质。如果分别测得材料和纯水的有效介电常数,就可以用有效介质模型分析各自的体积分数,得到含水材料的有效

介电常数。最终目的就是通过测量太赫兹光学常数用有效介质模型得到材料中水的体积分数。已有大量的文章研究依赖于太赫兹频率的液态水的太赫兹介电常数[19] [20]。

一些广泛使用的有效介质模型包括 Maxwell-Garnet (MG) [21], Bruggeman (BG) [22], 和 Landau-Lifshitz-Looyenga (LLL)模型, 在研究中需要考虑表面粗糙度和散射对有效介质模型的影响, 以及散射对太赫兹成像的影响[23]。

在太赫兹范围内, 液体水的介电常数表现出非常广泛的光谱特点。因此, 添加到材料中的水通常会增加整体在太赫兹频率范围内的吸收, 而不引入其他频谱特征。极性水分子可能会与寄主材料相互作用或者与主材料表面的极性官能团的产生弱粘结, 形成“结合水”。研究表明, 部分主材料中的结合水、束缚水的介电行为与自由水本体水的介电行为是完全不同的。结合水的活动被主材料表面分子束缚而被局域化, 所以结合水对主材料的表面修饰后水分子的振动可能导致较低的折射率和吸收系数。

3. 太赫兹成像水分检测

水是极性分子, 对太赫兹波有十分强的吸收性。水分子之间通过氢键形成复杂的网络结构, 众所周知, 一个水分子可通过四个氢键和其附近的水分子连接, 形成一个局域四面体结构。当太赫兹波穿过水分子时, 水网络结构中的氢键受激产生共振, 水分子偶极发生旋转取向, 并经弛豫形成新的氢键网络。水分子间在皮秒量级时间内可以发生多种相互作用, 并在远红外和微波区域产生共振和弛豫, 形成对太赫兹波的强烈吸收。所以含水量低的区域对太赫兹波吸收少透过率高; 反之, 含水量高的区域透过率低。二维太赫兹技术可以创建材料中水分或其他液体扩散的图像, 提取平均扩散系数, 观察局部和各向异性变化的扩散系数, 无损评估材料的水化程度。如果材料中存在裂缝、空隙、划痕, 可能成为水的扩散路线。通过太赫兹水分成像, 可以表征这些材料存在的缺陷。

3.1. 树叶水分检测

最早在 1995 年, 美国 AT&T 贝尔实验室的 Hu 和 Nuss 等人[24]首次设计实现了太赫兹时域光谱技术的太赫兹成像系统基于光电导天线, 并且通过该系统成功获得半导体集成电路的太赫兹成像图和新鲜树叶的太赫兹图像, 从此揭开了太赫兹成像水分检测领域研究的序幕。树叶水分成像是太赫兹用于水分检测最早的实验[24] [25]。根据入射太赫兹波被树叶不同部位吸收后其辐射强度的强弱变化, 透射辐射波的强度变化与图像的颜色深度变化成比例, 据此可利用太赫兹图像观测树叶或其他植物内水分含量及分布。除此之外, 还可以利用太赫兹光谱技术可以查看植物体内水分的分布方式和运输过程, 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等等。

Hadjiloucas 等[26]利用太赫兹辐射技术研究了树叶中水分在 0.1~0.5 THz 范围之间的频谱变化, 实验结果获得了不同树叶的水分含量情况, 并且分析了其影响因素, 实现了对不同水分含量的叶片的分类。在 Jeong 等人[27]的研究中, 他们用太赫兹电子激光成像系统获得银杏叶片的图像, 将其与可见光透射图像进行对比, 研究表明, 水在两种频率光波下所表现出的不同的吸收系数是两种成像方法的主要区别的原因。张艳洁等人[28]研究发现, 太赫兹透过率及水分蒸发量均与树龄成反比, 对于树龄越大银杏叶片, 其水分的蒸发就越多。

在 1996 年, 张希成等人[29]利用电光晶体和 CCD 相机构建了太赫兹实时成像系统, 这种方法有效提高了太赫兹成像速度, 其研究成果迅速在全世界引起科学家的广泛关注。随后, 太赫兹成像就随着短的单周期宽带宽脉冲辐射产生太赫兹的时域光谱系统的发展而改进, 以及窄带太赫兹、半导体技术和光学的发展而突飞猛进。

Cumis 等人[30]将量子级联激光器的空间滤波技术成功应用于透射模式的太赫兹共焦显微技术, 在该

系统中,量子级联激光器的光束首先通过 200 μm 孔径的空心介质波导进行空间滤波,该空心介质安装在—对匹配透镜的共焦平面,可以优化图像分辨率。他们测试了一片新鲜树叶的叶脉,如图 1 所示,实验结果表明,通过空间滤波方式后,图像的分辨率得到极大提高。

南京大学的吴培亨等人[31]利用透射太赫兹波扫描成像系统获得新鲜树叶和放置两天后的树叶所含水量的分布图像。他们对风干的树叶进行太赫兹成像,发现太赫兹波对树叶的不同组织及不同厚度穿透能力是不一样的,与光学图像对比发现,即使是风干后的树叶,其茎脉仍然比较清晰,组织结构基本完全呈现出来。在实验过程中发现,对于新鲜度较高的树叶,即含水量较高时,太赫兹图像的效果将会较差。该实验结果有望用于林业、农业中植物水分含量的测定。

通过以上研究结果表明,太赫兹技术可以监测叶片水分变化,太赫兹波穿过含水的叶子会发生线性衰减,检测叶片含水量对植物进行水分监测是太赫兹波技术的一个重要应用领域。叶片含水量的评价为农民和科学家提供了有价值的信息用于植物的干旱和灌溉管理。对于水资源有限的地区,根据实验结果建议,可优化利用现有得水资源,提高灌溉效率,解决水资源匮乏的关键问题。Mittleman 等人[32]的研究证明,太赫兹技术可用于研究叶子中水分运输时间动力学。太赫兹图谱可以检测叶子的健康程度,此结果可用来估计农作物产量。

3.2. 纸的水分检测

纸的水分含量是其制造过程中的一个重要参数其含量会影响纸的质量。造纸过程中需要在线检测纸的水分干燥过程[33]。纸的性能,如收缩和强度由水分的分布影响。不均匀的水分分布会导致纸破裂、卷曲或起皱[34]。目前造纸行业的水分检测技术[35]没有测量水分的映射图像,而是记录点或平均值。干燥的纸具有较低的 THz 吸收和散射。纸的主要成分是纤维素纤维,它很容易吸收环境中的水分,从而改变其有效介电常数。纤维素纤维的尺寸小于 THz 波长,证明纤维与吸收水的结合可以视为一个有效介质。早期采用太赫兹测量纸张水分是用纸与水分衰减系数的线性组合做为有效介质模型[36]。实验结果表明,太赫兹相位会随着水分含量的衰减发生线性变化。水分含量衰减和 THz 波相位变化可以通过测量复介电常数得到[37]。例如,在 56% 的环境湿度中测量纸张的水分含量,其有效折射率和衰减系数的增加可以用 Clausius-Mossotti 方程作为一种有效的介质模型建模[38]。在采用 Bruggeman 有效介质模型研究干燥纸中水分的光学性质的文章中,假设纸是均匀的,并且所含水分均匀分布的[39]。

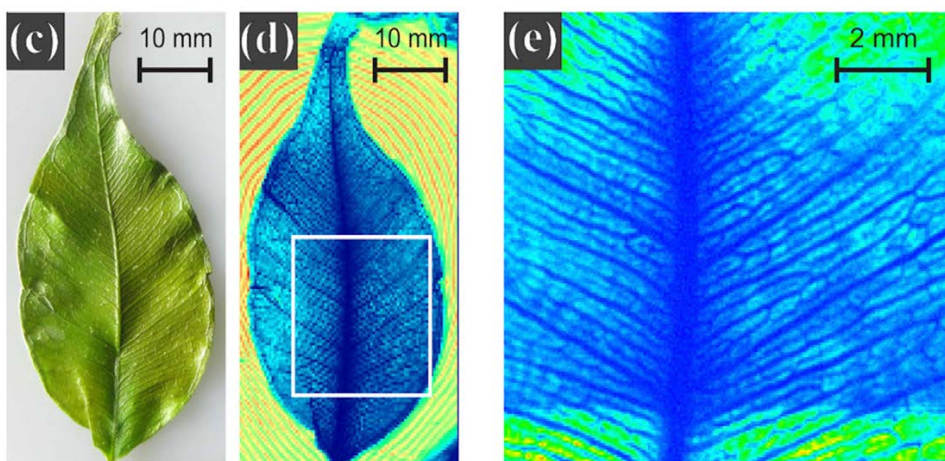


Figure 1. Photograph of a fresh leaf and corresponding high-resolution THz images acquired with different step size [30]

图 1. 新鲜叶子的光学照片和 0.2 mm, 0.05 mm 步长下获得的高分辨率太赫兹图像[30]

3.3. 木材的水分检测

Fujii 等人[40]用 100 GHz 毫米波穿透 18 mm 的木材检测是否有白蚁损害。他们的研究表明木头对太赫兹的吸收随着所含水分线性变化[41] [42] [43]。木材制造过程中尤为重要一个参数就是监测木材的水分含量及分布。木材的水分含量低,可以改善材料的机械强度,在干燥过程中,多余水分会加速木材的降解。太赫兹光谱和成像技术可以做为一种无损评估用于葡萄酒或其他饮料的天然软木塞、栓皮栎制品的技术手段[44]。天然软木在径向生长方向的扩散系数大于其他两个方向,由于其平行的径向生长方向形成透镜状通道[45]。透镜状通道,使水和气体可以漫过软木。此外,可能存在裂缝、孔洞和缺陷增加液体的扩散。软木塞中易挥发化学物质的浸出和迁移取决于其局部扩散率和葡萄酒与软木塞接触面之间挥发物的存在。干燥和潮湿的软木的太赫兹吸收可以用有效介质理论来模拟[45]。图 2 展示了不同水分含量的天然软木的太赫兹图谱。

3.4. 食品中水分检测

压缩食品中的水分可用太赫兹进行检测[46]。压缩食品中的水分含量会影响食品质量,包括味道、质地、硬度、细菌生长和保质期等。水会强烈吸收太赫兹辐射,其他成分如,蛋白质在太赫兹波段的吸收系数小于水的吸收系数的 1%。典型的脂肪和油脂在太赫兹波段的吸收系数不到水的 1/20,而淀粉在太赫兹波段的吸收系数大约是水的 1/50。Parasoglou 等人对干燥食品中的水分进行定量检测[47] [48]。在他们的实验中,对常用于糖果工业的淀粉片进行检测。样品水分含量较低且为多孔结构。假设食物中孔隙很小,以水分对太赫兹的吸收为主,食品样品的其他成分对太赫兹的吸收远小于水分的吸收。利用太赫兹测量的另一个优点是,太赫兹功率非常小,不会加热样品导致其变质。

利用太赫兹成像可以作为山核桃等坚果无损评价技术[49]。在坚果壳内,坚果仁的水分含量较低,山核桃坚果对 THz 辐射相当于透明。因此,太赫兹吸收增加,表明可能存在缺陷,在一个共同的缺陷,就是坚果内活的昆虫,取食果仁。因为活的昆虫通常包含 70%~80%水,而坚果仁的水分含量通常小于 10%。因此,通过太赫兹的水吸收可以识别被昆虫蚕食的产品。利用太赫兹技术可测量小麦水分含量[50]。

利用太赫兹成像可以从水果表面评估压力引起其内部损伤的程度[51]。例如番茄,外部压力破坏番茄表皮的细胞壁,造成局部充水现象,随着时间的推移,受损区域逐渐失去水分,果实表面形成棕色区域。太赫兹技术可以利用水的高吸收度确定和计算水果或蔬菜的水分含量,从而检测出果实内部损坏程度。尤其对于隐藏在树冠叶子背后的水果,太赫兹辐射可以透过含水量较低的树叶从侧面评估含水量高的水果。

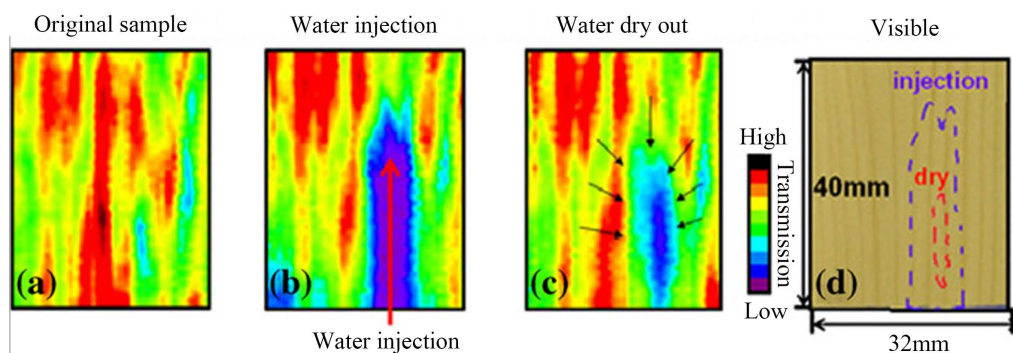


Figure 2. (a) THz transmission image of spruce wood sample. (b) Same sample after localized injection of water. (c) THz image after sample loses 90% of injected water by weight. (d) Visible image of sample. Reprinted from [8]

图 2. (a) 云杉木样品的太赫兹透射图。(b) 注入水之后云杉木样品的太赫兹透射图。(c) 样品蒸发 90%水分以后的太赫兹图谱。(d) 样品的可见图。来源于参考文献[8]

4. 水合作用的太赫兹检测

在 THz 频段,大量水的弛豫行为的介电损失简单的对应于水合作用的水分子总数。因此 THz 时域光谱技术被用来直接测量皮秒量级的水分子动力学[52]。由于氢键网络的分子间集体振动处于皮秒量级,那么氢键网络的拓扑结构变化或动力学变化都能够被直接被 THz 光谱检测到。因此 THz 光谱技术能够比其他技术对于水溶液的动力学更加灵敏。研究水合作用的主要途径是获取水合作用的两个重要参数,一个是水合层的半径,一个是水合分子数。Born 等人[53]利用 THz 光谱技术来探讨蛋白诱导下泛素的快速溶剂化动力学,通过对几个泛素特殊位点突变体进行吸光谱测定,确定蛋白质表面的动态水化层厚度至少是 18 埃,这远远超过了由散射方法观察到的静态水化层(3 埃)。Havenith 等[54]在蛋白质对溶剂的影响距离及影响方式的问题上进行了探讨,通过 THz 光谱技术对溶剂化动力学、动态水化层厚度进行研究,发现蛋白质周围溶剂化层的相互重叠会导致 λ 蛋白的 THz 吸收产生非单调趋势。蛋白质对水分子网络运动的影响距离在 20 埃以上,这远大于理论长度。THz 实验表明一个蛋白质可以影响 1000 个水分子。

M. Havenith 研究小组[55] [56]报道了在高度稀释的水合的生物分子的 THz 吸收系数测量。而随着溶质浓度的增加,不同溶质分子的水合层发生叠加,将导致吸收系数关于溶质浓度相比于高度稀释情况下的非线性行为。V. Matvejev 等人[57]在假设属于不同水合层的水分子与它们单独属于一个水合层时的动力学相同的情况下,研究了醇类水溶液的水合层半径,并研究了水合层吸收系数的提取方法。Takashi Arikawa 等人[58]利用 THz 时域衰减全反射光谱技术测量了单糖和二糖水溶液的水合分子数。其方法是通过评估介电损耗的减少量和相对应的介电常数的实数部分来对水合水分子的数量实现定量的评估。

5. 结束语

除在工业、林业及食品加工业领域的应用,在生物医学研究领域,可利用太赫兹图谱对肿瘤和正常组织的进行鉴别[19]。因为肿瘤组织的含水量通常是大于正常组织的,利用这个特点,太赫兹光谱技术很容易将异常组织和正常组织区分开。太赫兹图谱已经应用于皮肤癌、烧伤生物组织的检测,在这些组织中含有丰富的水,这些水的存在如同一把双刃剑,既有利于组织的鉴定,又大量吸收太赫兹波,影响检测的准确性。所以如何克服水分子对太赫兹波的吸收,从具有很强的水分子吸收背景中提取生物组织的太赫兹波特征吸收峰是太赫兹光谱技术走向实际应用前必须解决的基本问题。

根据上述的研究结果,太赫兹成像技术在工业、林业和农业中的应用已显示出巨大的应用潜力。这些大量关于树叶、纸、塑料复合材料、天然软木的研究为太赫兹成像技术在这些领域的深度应用提供了基础理论及方法。但是太赫兹技术并没有广泛应用到工业、林业和农业的生产过程中,如混凝土质量在线监测,水果生长过程监测等,木材加工过程的实时在线检测等。因此需要开发更多的应用证明太赫兹的有效探测能力。例如,通过分析水的太赫兹图像测定扩散系数,以及样品的裂纹和缺陷中的水分布,检测裂缝、孔洞、划痕的材料中水的扩散路线及局部扩散系数等。同时由于大部分生物组织所含有的丰富的水,导致对太赫兹波的强烈吸收,大大降低了生物组织成像的灵敏度,所以对含水量较多的生物组织无法清晰成像,其成像分辨率低,灵敏度低,这些技术缺点严重限制了太赫兹辐射成像在生物医学领域中的应用。而且目前大多数太赫兹辐射成像的实验获取数据时间较长,对于生物组织可能会存在样品的变性、失活等问题。除此之外,太赫兹图像的质量也是评估的重要影响因素之一,已经有一些研究开始关注通过算法提高太赫兹图像的质量或者是降低太赫兹图像的噪声。总而言之,太赫兹成像技术会成为无损评价产品及生物组织水分含量、水分分布变化的新技术。

在水合作用的太赫兹检测研究中,几乎所有的对水合作用的研究都是针对单溶质的,而不涉及多溶质分子。由于多溶质水溶液的分子体系的复杂性,特别是存在溶质水合层之间的相互作用,使得多溶质

分子的水溶液的水合作用的研究变得困难, 目前还没发现利用 THz 光谱技术研究多溶质水溶液水合作用的相关报道。

与此同时, 本实验室致力于多溶质水合分子数及水合层吸收系数的研究, 该研究成果将为下一步的太赫兹成像技术的发展提供理论依据及方法。

基金项目

国家自然科学基金项目(21503045, 61540048)贵州省社会发展科技攻关计划项目(SY20143065); 贵州省科学基金(J20142107)。

参考文献 (References)

- [1] 郭澜涛, 牧凯军, 张存林, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 51-56.
- [2] 张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与电子学进展, 2010, 47(023001): 1-14.
- [3] 张振伟. 脉冲 THz 时域光谱成像及连续 THz 波成像相关技术研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
- [4] Liu, H.B., Zhong, H., Karpowicz, N., *et al.* (2007) Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications. *Proceedings of the IEEE*, **95**, 1514-1527.
- [5] Federici, J.F., Schulkin, B., Huang, F., *et al.* (2005) THz Imaging and Sensing for Security Applications—Explosives, Weapons and Drugs. *Semiconductor Science and Technology*, **20**, S266-S280. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/7/018>
- [6] Michalopoulou, Z.H., Mukherjee, S., Hor, Y.L., *et al.* (2010) RDX Detection with THz Spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **31**, 1171-1181. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9693-1>
- [7] Federici, J. and Moeller, L. (2010) Review of Terahertz and Subterahertz Wireless Communications. *Journal of Applied Physics*, **107**, 111101-1-111101-22.
- [8] Jansen, C., Wietzke, S., Peters, O., *et al.* (2010) Terahertz Imaging: Applications and Perspectives. *Applied Optics*, **49**, E48-E57. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000E48>
- [9] Stoik, C.D., Bohn, M.J. and Blackshire, J.L. (2010) Nondestructive Evaluation of Aircraft Composites Using Reflective Terahertz Time Domain Spectroscopy. *NDT and E International*, **43**, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.09.005>
- [10] Stoik, C.D., Bohn, M.J. and Blackshire, J.L. (2008) Nondestructive Evaluation of Aircraft Composites Using Transmissive Terahertz Time Domain Spectroscopy. *Optics Express*, **16**, 17039-17051. <https://doi.org/10.1364/OE.16.017039>
- [11] Rahani, E.K., Kundu, T., Wu, Z., *et al.* (2011) Mechanical Damage Detection in Polymer Tiles by THz Radiation. *IEEE Sensors Journal*, **11**, 1720-1725. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2095457>
- [12] 张振伟, 崔伟丽. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 3(25): 218-220.
- [13] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] Horvath, Z.L., Vinko, J., Bor, Z., *et al.* (1996) Acceleration of Femtosecond Pulses to Superluminal Velocities by Gouy Phase Shift. *Applied Physics*, **63**, 481-484. <https://doi.org/10.1007/BF01828944>
- [15] Reid, M. and Fedosejev, R. (2006) Terahertz Birefringence and Attenuation Properties of Wood and Paper. *Applied Optics*, **45**, 2766-2772. <https://doi.org/10.1364/AO.45.002766>
- [16] Jordens, C., *et al.* (2009) Evaluation of Leaf Water Status by Means of Permittivity at Terahertz Frequencies. *Journal of Biological Physics*, **35**, 255-264. <https://doi.org/10.1007/s10867-009-9161-0>
- [17] Jordens, C., *et al.* (2010) Investigation of the Water Absorption in Polyamide and Wood Plastic Composite by Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Polymer Testing*, **29**, 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.11.003>
- [18] Teti, A.J., Rodriguez, D.E., Federici, J.F., *et al.* (2011) Non-Destructive Measurement of Water Diffusion in Natural Cork Enclosures Using Terahertz Spectroscopy and Imaging. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **32**, 513-527. <https://doi.org/10.1007/s10762-011-9769-6>
- [19] Taylor, Z.D., Singh, R.S., Benneter, D.B., *et al.* (2011) THz Medical Imaging: *In Vivo* Hydration Sensing. *IEEE Transactions on THz Science and Technology*, **1**, 201-219.
- [20] Liebe, H.J., Hufford, G.A. and Manabe, T. (1991) A Model for the Complex Permittivity of Water at Frequencies below 1 THz. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **12**, 659-675. <https://doi.org/10.1007/BF01008897>

- [21] Maxwell-Garnett, J.C. (1904) Colours in Metal Glasses and in Metallic Films. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, **206**, 385-420.
- [22] Choy, T.C. (1999) Effective Medium Theory: Principles and Applications. International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, Oxford.
- [23] Bandyopadhyay, A., Sengupta, A., Barat, R.B., *et al.* (2007) Effects of Scattering on THz Spectra of Granular Solids. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **28**, 969-978. <https://doi.org/10.1007/s10762-007-9276-y>
- [24] Hu, B.B. and Nuss, M.C. (1995) Imaging with Terahertz Waves. *Optics Letters*, **20**, 1716-1718. <https://doi.org/10.1364/OL.20.001716>
- [25] Mittleman, D.M., Jacobsen, R.H. and Nuss, M.C. (1996) T-Ray Imaging. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **2**, 679-692. <https://doi.org/10.1109/2944.571768>
- [26] Hadjiloucas, S., Karatzas, L.S., Bowen, J.W., *et al.* (1999) Measurements of Leaf Water Content using Terahertz Radiation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 142-149. <https://doi.org/10.1109/22.744288>
- [27] Jeong, Y.U., Cha, H.J., Park, S.H., *et al.* (2004) THz Imaging by a Wideband Compact FEL. *26th International Free Electron Laser Conference and 11th FEL User Workshop Proceeding of the 2004 FEL Conference*, Trieste, 667-670.
- [28] 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.
- [29] Wu, Q., Hewitt, T.D. and Zhang, X.C. (1996) Two Dimensional Electro-Optic Imaging of THz Beam. *Applied Physics Letters*, **69**, 1026-1028. <https://doi.org/10.1063/1.116920>
- [30] Dean, P., Valavanis, A., Keeley, J., *et al.* (2014) Terahertz Imaging using Quantum Cascade Lasers—A Review of Systems and Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47**, Article ID: 374008. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/37/374008>
- [31] 张彩虹, 盖博, 吴培亨. 基于远红外激光源的太赫兹成像[J]. 超导技术, 2007, 35(3): 245-247.
- [32] Chan, W.L., Deibel, J. and Mittleman, D.M. (2007) Imaging with Terahertz Radiation. *Reports on Progress in Physics*, **70**, 1325-1379. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/8/R02>
- [33] Banerjee, D., Von Svon, S.W., Thomson, M.D., *et al.* (2008) Diagnosing Water Content in Paper by Terahertz Radiation. *Optics Express*, **16**, 9060-9066. <https://doi.org/10.1364/OE.16.009060>
- [34] Carts, P.Y. (2005) Terahertz Imaging Brings New Capabilities to QC Applications. *Laser Focus World*, **41**, 109-114.
- [35] Hasmemi, S. and Douglas, W.J.M. (2003) Moisture Non-Uniformity in Drying Paper: Measurement and Relation to Process Parameters. *Drying Technology*, **21**, 329-347. <https://doi.org/10.1081/DRT-120017754>
- [36] Boulay, R., Gagnon, R., Rochette, D., *et al.* (1984) Paper Sheet Moisture Measurements in the Far Infrared. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **5**, 1221-1234. <https://doi.org/10.1007/BF01010048>
- [37] Banerjel, D. (2009) Measurement of Paper Moisture Content using Terahertz Imaging. International Paperworld IPW, No. 12, 14021.
- [38] Hattori, T., Kumon, H., Tamazumi, H. (2010) Terahertz Spectroscopic Characterization of Paper. *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Rome, 5-10 September 2010. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2010.5612460>
- [39] Mousavi, P., *et al.* (2009) Simultaneous Composition and Thickness Measurement of Paper using Terahertz Timedomain Spectroscopy. *Applied Optics*, **48**, 6541-6546. <https://doi.org/10.1364/AO.48.006541>
- [40] Oyama, Y., Zhen, L., Tanabe, T., *et al.* (2009) Sub-Terahertz Imaging of Defects in Building Blocks. *NDT and E International*, **42**, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.08.002>
- [41] Fujii, Y., Narahara, K., Fujiwara, Y., *et al.* (2007) Nondestructive Detection of Termites Using a Millimeter-Wave Imaging Technique. *Forest Products Journal*, **57**, 75-79.
- [42] Fujii, Y., Fujiwara, Y., Tanaka, S., *et al.* (2010) Feasibility of Millimeter Wave Imaging as Tool for Nondestructive Inspection of Wood and Wooden Structures. *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Rome, 5-10 September 2010, 1-2.
- [43] Hor, Y.L., Federici, J.F. and Wample, R.L. (2008) Nondestructive Evaluation of Cork Enclosures using Terahertz/Millimeter Wave Spectroscopy and Imaging. *Applied Optics*, **47**, 72-78. <https://doi.org/10.1364/AO.47.000072>
- [44] Pereira, H.C. (2007) Biology, Production and Uses. Elsevier, New York.
- [45] Rosa, M.E. and Fortes, M.A. (1993) Water Absorption by Cork. *Wood and Fiber Science*, **25**, 339-348.
- [46] Labuza, T.P. and Hyman, C.R. (1998) Moisture Migration and Control in Multi-Domain Foods. *Trends in Food Science & Technology*, **9**, 47-55. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00005-3)
- [47] Parasoglou, P., Parrott, E.P.J., Zeitler, J.A., *et al.* (2009) Quantitative Moisture Content Detection in Food Wafers. *34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Busan, 21-25 September 2009, 1-2.

- [48] Parasoglou, P., Parrott, E.P.J., Zeitleret, J.A., *et al.* (2010) Quantitative Water Content Measurements in Food Wafers Using Terahertz Radiation. *Terahertz Science and Technology*, **3**, 172-182.
- [49] Li, B., Cao, W., Mathankeret, S., *et al.* (2010) Preliminary Study on Quality Evaluation of Pecans with Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Proceedings of SPIE*, **7854**, 78543V. <https://doi.org/10.1117/12.882201>
- [50] Chua, H.S., Obradovic, J., Haight, A.D., *et al.* (2005) Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Crushed Wheat Grain. *MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Long Beach, 17 June 2005, 2103.
- [51] Ogawa, Y., Hayashi, S., Kondo, N., *et al.* (2006) Feasibility on the Quality Evaluation of Agricultural Products with Terahertz Electromagnetic Wave. *ASABE Annual International Meeting*, Providence, 29 June-2 July 2006, 1-12.
- [52] Jepsen, P.U., Cooke, D.G. and Koch, M. (2011) Terahertz Spectroscopy and Imaging-Modern Techniques and Applications. *Laser & Photonics Reviews*, **5**, 124-166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>
- [53] Wittlin, A., Genzel, L., Kremer, F., *et al.* (1986) Far-Infrared Spectroscopy on Oriented Films of Dry and Hydrated DNA. *Physical Review A*, **34**, 493-500. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.34.493>
- [54] Ebbinghaus, S., Kim, S.J., Heyden, M., *et al.* (2007) An Extended Dynamical Hydration Shell around Proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*, **104**, 20749-20752. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709207104>
- [55] Born, B. and Havenith, M.J. (2009) Infrared Millim. *Terahertz Waves*, **30**, 1245-1254.
- [56] Luong, T.Q., Verma, P.K., Mitra, R.K. and Havenith, M. (2011) Do Hydration Dynamics Follow the Structural Perturbation during Thermal Denaturation of a Protein: A Terahertz Absorption Study. *Biophysical Journal*, **101**, 925-933. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2011.05.011>
- [57] Matvejev, V., Zizi, M. and Stiens, J. (2012) Hydration Shell Parameters of Aqueous Alcohols: THz Excess Absorption and Packing Density. *Journal of Physical Chemistry B*, **116**, 14071-14077. <https://doi.org/10.1021/jp305356d>
- [58] Arikawa, T., Nagai, M. and Tanaka, K. (2008) Characterizing Hydration State in Solution using Terahertz Time-Domain Attenuated Total Reflection Spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, **457**, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2008.03.062>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-1557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aac@hanspub.org