

文章编号: 2095-4980(2018)02-0195-06

若干食品添加剂的太赫兹光谱检测与分析研究进展

刘英^{ab}, 赵国忠^{abc*}

(首都师范大学 a.物理系; b.北京市太赫兹波谱与成像重点实验室; c.太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 随着太赫兹(THz)技术的快速发展, 其在食品、药品、生物大分子检测等领域的巨大应用前景越来越被人们所重视。在食品领域, 由于许多食品添加剂在太赫兹波段具有特征吸收峰, 它们的指纹谱有望被用来进行食品添加剂的监测和分析, 具有重要的研究意义和应用价值。鉴于此, 针对不同研究小组所开展的工作, 概括总结了一些有关食品添加剂的太赫兹光谱检测与分析研究进展, 并讨论了该技术应用于食品添加剂检测方面有待解决的问题, 从而展望未来的发展趋势。

关键词: 太赫兹时域光谱; 食品添加剂; 吸收系数; 折射率; 光谱检测

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0195

Progress on terahertz spectroscopic inspection and analysis of several kinds of food additives

LIU Ying^{ab}, ZHAO Guozhong^{abc*}

(a.Department of Physics; b.Beijing Key Laboratory of Terahertz Spectroscopy and Imaging; c.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, Terahertz(THz) technology has got a rapid development and has a huge potential applications in the inspection of food, medicine, biological macromolecules and other fields. In the field of food inspection, many food additives have their characteristic absorption peaks in THz frequency range. These finger spectra are possible to be utilized for the monitoring and analysis of food additives. It has attracted the attention of many domestic and international research groups. The research progresses of these different groups on the food additives by THz spectroscopy inspection and analysis are summarized. The problems of THz spectroscopic technology existing in the inspection of food additives are discussed. The future trends of development are outlook according to these researches.

Keywords: Terahertz Time Domain Spectroscopy(THz-TDS); food additives; absorption coefficient; refractive index; spectroscopic inspection

太赫兹(THz)波是频率在 0.1~10THz 范围内的相干电磁辐射, 很多物质在此波段内都有响应, 利用太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术对太赫兹波电场的振幅以及相位变化进行采集, 可以获得被检测样品明显的特征吸收谱和折射率谱。太赫兹波具有许多独特的优点, 如相比 X 射线, 它的光子能量很低, 不会造成辐射电离, 能够使所测材料完好保存^[1]; 而与红外线相比, 太赫兹波能够穿透许多非极性包装材料, 从而可以探测隐藏在包装材料内部的物体或商品。

目前食品质量安全问题已成为全社会关注的热点, 尤其是近年来诸多关于食品添加剂违规使用问题的出现, 使得食品添加剂带来的安全隐患再次引起了高度关注。虽然现有的食品添加剂检测方法不少^[2-3], 但是在检测周期、检测质量等方面还存在很多局限, THz-TDS 技术作为一种有效的无损检测手段, 在 3.0 THz 以下其信噪比高, 稳定性好, 而且可以方便、快捷地得到透过材料的太赫兹电场振幅和相位信息, 大多数物质的太赫兹光谱都表现出明显的特征性, 例如不同物质的吸收峰位置、个数、强度以及折射率都存在差异。基于上述优点, 先后有不少

收稿日期: 2017-03-09; 修回日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575130, 61575131, 50971094); 北京市自然科学基金资助项目(1092007); 北京市教育委员会科技计划重点资助项目(KZ201310028032)

*通信作者: 赵国忠 email: guozhong-zhao@126.com

小组把该技术应用于食品添加剂的检测与分析,根据折射率大小的差异和吸收峰位的特征,可有效区别食品添加剂的种类。除此之外,许多小组对食品添加剂混合物的太赫兹吸收谱做了定量分析,初步探索了 THz-TDS 技术应用于食品添加剂定量分析的美好前景。

本文主要介绍了太赫兹时域光谱技术在食品添加剂检测方面一些已有的工作。从食品添加剂的 THz 光谱中分析不同分子基团在太赫兹波段的振动频率,利用高斯软件中的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)方法进行数值模拟和有关 THz 吸收光谱与分子间氢键相关的集体振动模式理论分析,说明太赫兹时域光谱技术在食品添加剂的研究方面有着极大的应用价值和潜在的应用前景。

1 太赫兹时域光谱技术

太赫兹时域光谱技术源于 20 世纪 80 年代,是由美国 AT&T 通信公司的 Bell 实验室和美国 IBM 公司的 T J Watson 研究中心提出并发展起来的^[4]。其原理是利用飞秒激光照射太赫兹辐射源以激发得到宽带太赫兹脉冲^[5],通过合理的光路使太赫兹脉冲穿过样品或者在样品表面发生反射以获得含有样品特征谱的太赫兹信号,对比该样品信号与太赫兹脉冲在自由空间中传播同样光程后得到的参考信号,分析这 2 个太赫兹脉冲幅值和相位的相对变化,从而可以计算出样品的复折射率、吸收系数、介电常数和电导率等参数。

与其他光谱技术相比,太赫兹时域光谱技术有其独特的性质。首先,太赫兹时域光谱测量的频谱区间是太赫兹频段,这是其他光谱技术很难获得的。其次,由于太赫兹脉冲具有亚皮秒脉冲宽度,它非常容易被用来进行时间分辨的光谱测量,用以探测样品的动态性质。最后,太赫兹脉冲的测量属于相干测量,可以探测载流子动力学中的相干过程。常见的透射型太赫兹时域光谱系统是应用最早、使用最广泛的 THz 时域光谱技术^[6],在军事、通信、医学等领域都有着广泛的应用前景。

2 食品添加剂的太赫兹光谱研究现状

太赫兹时域光谱技术作为一种新型的探测手段,其在食品质量检测方面已有很多突破,国内外的不同研究小组利用太赫兹时域光谱技术对食品添加剂开展了一系列研究,这里总结如下。

2.1 非法添加剂的太赫兹光谱研究现状

目前,熟知的非法添加剂主要有苏丹红 1 号和三聚氰胺等,检测食品中三聚氰胺的方法不断问世^[7],THz 技术作为一种新型无损检测手段,为判断食品中是否有三聚氰胺提供了依据。

2.1.1 苏丹红 1 号

“苏丹红 1 号”是一种人造化学制剂,由于能造成人类肝脏细胞的 DNA 突变,显现出可能致癌的特性,所以严禁加入辣椒中。

2008 年,张光新小组运用 THz-TDS 技术对苏丹红 1 号纯品进行测量^[8],采用 T D Dorney 和 L Duvillaret^[9-10]等提出的提取材料光学参数的物理模型,计算得到苏丹红的吸收系数和折射率,可知在 0.5~2.0 THz 频段有 4 个明显的吸收峰,分别位于 0.62 THz,0.89 THz,1.48 THz 和 1.83 THz,其平均折射率为 1.86,其中 0.89 THz 处的吸收峰来源于分子间的振动,其余 3 个吸收峰来源于苯环的扭摆以及整个分子骨架的扭摆。

2.1.2 三聚氰胺

三聚氰胺是一种三嗪类含氮杂环有机化合物,由于其含氮量很高,商家把其加入食品中来提高氮含量。此外,三聚氰胺有轻微毒性,长期服用会造成生殖、泌尿系统的损害,膀胱、肾部结石,并可进一步诱发膀胱癌。奶粉事件的发生,使人们对三聚氰胺的关注度提高。

2009 年至今,一直有一些小组用 THz-TDS 技术对三聚氰胺进行检测和分析^[11-16],结果发现在 0.1~3.0 THz 频段内有 3 个吸收峰,分别位于 2 THz,2.26 THz 和 2.6 THz。韩国中央大学的实验结果表明,不管三聚氰胺被混合在何种食物中,只要含量高于 0.5%就能被检测到。他们选择 2.0 THz 处的峰位做一个含量的预测图,线性相关系数大于 0.9,说明可以定量检测三聚氰胺在食品中的含量。

2.1.3 过氧化苯甲酰

过氧化苯甲酰是白色或黄色细柱,具有强氧化性,对面粉起漂白和防腐作用。由于此添加剂不仅会破坏面粉的营养,长期使用还会导致肝病,引起多种疾病^[17],2011 年卫生部禁止其作为面粉添加剂使用。

河南工业大学的一个小组用 THz-TDS 技术对过氧化苯甲酰、面粉和其混合物进行测量^[18],分析了它们在

0.2~1.5 THz 频段内的吸收系数和折射率情况。结果显示,其吸收系数非常小,并没有明显的吸收峰。其光谱特性与面粉的光谱特性不同,面粉的吸收系数随频率的增加呈上升趋势,对太赫兹波的吸收较强。面粉与过氧化苯甲酰混合物的吸收系数在此频段小于面粉,大于过氧化苯甲酰。折射率谱上的差异为:平均折射率的变化是过氧化苯甲酰(1.89)>面粉(1.78)>混合物(1.73),即混合物的折射率是有别于纯品的。结合吸收系数和折射率差异,可以看出,太赫兹光谱技术可以检测出面粉中是否含有过氧化苯甲酰非法添加剂。

2.2 食品添加剂的太赫兹光谱研究现状

对于食品添加剂的太赫兹光谱特性研究,先后有不同小组对抗结剂(滑石粉)、抗氧化剂(特丁基对苯二酚、L-抗坏血酸、酒石酸)、甜味剂(木糖醇、D-木糖、阿斯巴甜)和营养强化剂(若干维生素)进行了检测分析,推进了太赫兹光谱技术在食品添加剂检测方面的应用。

2.2.1 抗结剂

滑石粉是用于医药、食品行业的一种抗结剂,主要添加到面粉中改善口感,具有无毒、无味、口味柔软、光滑度强等特点,因此可以食用,但使用过量或长期食用会致癌。国家标准 GB2760-2011 中规定,滑石粉在凉果类和话化类(甘草制品)中最大使用量是 20.0 g/kg。如果面粉中滑石粉的含量不超过 2%,是可以使用的。所以,检测食品中滑石粉的含量具有重要意义。

中国计量学院的付秀华小组,对滑石粉的太赫兹光谱特性进行了探究^[19],发现其在 0.2~1.5 THz 频段内有一个明显的吸收峰,位于 1.16 THz。而面粉的吸收系数在 0.2~1 THz 之间随频率增加呈上升趋势,无明显特征峰。面粉和滑石粉的不同比例混合物光谱特性规律为 1.16 THz 处的峰会随着滑石粉所占比例的减小而消失,只要面粉中滑石粉的含量高于 2%,在良好的检测条件下,就可以被检测到,为 THz-TDS 技术用于面粉中掺杂滑石粉的定量分析提供了新的依据。

2.2.2 抗氧化剂

抗氧化剂是指能防止或延缓食品氧化,提高食品稳定性和延长储存期的食品添加剂。它是一类能帮助捕获并中和自由基,从而祛除自由基对人体损害的一类物质。

1) 特丁基对苯二酚。特丁基对苯二酚(Tertiary Butylhydroquinone, TBHQ)是一种抗氧化剂。白色粉状结晶,有特殊气味,易溶于乙醇和乙醚,可溶于油脂,不溶于水,适用于植物油、猪油等,具有良好的抗氧化作用,可增强油脂在保质期内的稳定性。如果长期大量食用含有这种添加剂的食物,就有致畸、致癌的危险。

2011 年,沈京玲小组对 TBHQ 进行了太赫兹光谱特性研究^[20],获得其在太赫兹波段有效谱宽为 0.2~2.2 THz 光谱范围的吸收谱特性,结果表明在此波段内共有 6 个明显的吸收峰,分别为 0.879 THz,1.069 THz,1.45 THz,1.641 THz,1.846 THz 和 1.992 THz。面粉与 TBHQ 混合物样品的吸收峰同时体现两者的光谱特性,即使 TBHQ 只占到 0.49%,也有一个明显的吸收峰 1.641 THz 与纯品对应,从而能够检测出面粉中 TBHQ 的存在。

2) L-抗坏血酸。L-抗坏血酸也就是维生素 C,也是一种抗氧化剂。它能够保护身体免受自由基的威胁,能阻断致癌物亚硝酸铵的形成,广泛存在于新鲜水果、蔬菜及许多生物器官中。作为一种高活性物质,它参与许多新陈代谢过程,对生物体功能具有重要的影响。

2009 年,浙江大学的曹丙花等对这一重要的抗氧化剂做了光谱分析^[21],同年首都师范大学也对此进行了测量,明确表明其在 0.2~2.4 THz 波段有 4 个明显的吸收峰,分别位于 1.80 THz,2.05 THz,2.21 THz 和 2.34 THz。理论分析指出,1.80 THz 和 2.21 THz 处的吸收峰来源于分子内振动,其余吸收峰主要由分子间作用引起。对市售维生素 C 的测量,得出其特征峰与纯品一一对应,由此可见,运用 THz-TDS 技术去判断某样品是否为 L-抗坏血酸,技术上是可行的,在实际生活中也有重要意义。

3) 酒石酸。酒石酸作为食品中添加的另一种抗氧化剂,可以使食物具有酸味。在低温时,它对水的溶解度低,易生成不溶性的钙盐。酒石酸最大的用途是饮料添加剂。其学名为 2,3-二羟基丁二酸。

2008 年,日本大阪大学的 Rika nishikiori 等对酒石酸的几种同分异构体进行了测量^[22],给出了 L-酒石酸、D-酒石酸和 DL-酒石酸在 0.1~3.0 THz 之间的吸收光谱,结果表明 L-酒石酸和 D-酒石酸在 1.09 THz 处都有明显的吸收峰,D-酒石酸吸收峰的强度略低于 L-酒石酸,DL-酒石酸在 1.09 THz 处没有吸收谱。基于在 1.09 THz 处有无明显的吸收峰,对 L-酒石酸和 DL-酒石酸的比值为 2 和 0.5 的混合物进行了测量,比较两者光谱信息,得出 1.09 THz 处吸收峰对样品混合所导致的密度和颗粒大小的改变依赖关系更强,以此处的光谱数据进行线性拟合,其相关系数为 0.95,数据点明显偏离直线。进一步提取吸收谱上的 8 个光谱数据,运用多元线性回归法(Multivariable Linear Regression, MLR)、偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)、二次多项式偏最小二乘法(Quadratic PLS, QPLS)做定量分析,其相关系数都大于 0.99。PLS 和 QPLS 方法优于 MLS 方法,主要原因是后

两者解决了 THz-TDS 系统里复杂的基线问题。基于以上分析,太赫兹时域光谱系统只要结合合理的算法,就可以解决不同物质混合比问题。

2.2.3 甜味剂

甜味剂可以赋予食品或饲料以甜味,提高食品品质,满足人们对食品的需求。甜味剂应具备安全性高、引起味觉良好、稳定性高、水溶性好、价格合理等特点,甜度是甜味剂的重要指标。

1) 木糖醇和 D-木糖。木糖醇是一种功能性的甜味剂,更是糖尿病人的甜味剂、营养补充剂和辅助治疗剂。可以改善肝功能,预防龋齿等。D-木糖是一种无热量甜味剂,对人体肠道内的双歧杆菌有较高的增殖作用,食用木糖能改善人体微生物环境,保证人体正常的新陈代谢。

2011 年,首都师范大学的梁承森等运用 THz-TDS 技术对木糖醇和 D-木糖 2 种甜味剂做了测量^[23],D-木糖在 THz 波段有 3 个明显的吸收峰,分别为 1.67 THz,1.96 THz 和 2.46 THz,木糖醇在 THz 波段同样有 3 个明显吸收峰,分别为 1.62 THz,1.87 THz 和 2.51 THz,虽然吸收峰的数目一样,但其峰形和强度却各有不同。理论上分析 D-木糖的吸收峰位于 1.71 THz,木糖醇的吸收峰位于 1.64 THz,主要由于分子基团的骨架振动和扭转引起。实验与理论的不吻合主要有 2 方面原因,一是高斯软件模拟的单分子性,不能体现分子间作用引起的吸收峰;二是模拟的绝对零度性,吸收峰的位置向高频移动。说明 THz 波对物质结构及空间构型的敏感性,预示着 THz 光谱技术具有广泛的应用前景。

2) 阿斯巴甜。阿斯巴甜俗称甜味素,是白色结晶性粉末,和其他甜味剂比较具有甜味高、热量低的优点。糖尿病人和减肥人士,都把阿斯巴甜作为糖的代用品使用。可是阿斯巴甜的安全性尚不明确。研究显示,阿斯巴甜会过度刺激或干扰神经末梢,增加肌肉紧张,引起偏头痛。只要摄入阿斯巴甜的量保持在每千克体重每天 40 mg 以内,就是安全的。

2009 年,首都师范大学赵国忠研究小组对阿斯巴甜进行了太赫兹光谱分析^[24],结果发现在 0.2~2.5 THz 频段内共有 7 个吸收峰,分别为 0.24 THz,0.39 THz,0.54 THz,0.76 THz,0.88 THz,1.17 THz 和 2.0 THz,其中有 2 个明显的吸收峰位于 1.17 THz 和 2.0 THz 处,理论计算同样有 7 个吸收峰,由于样品和测量环境的限制,只有部分峰位相吻合。根据实际结果可以看出,太赫兹光谱为食品添加剂的检测提供了有效的手段。

2.2.4 营养强化剂

营养强化剂可以补充天然食品的营养缺陷,改善食品中的营养成分及其比例,从而满足人们对营养的需要。另外,它还可以减少和预防很多营养缺乏症及营养缺乏引起的并发症。除此之外,有些营养强化剂还兼有提高食品的感官质量和保藏性能的作用,所以营养强化剂是一类重要的食品添加剂。

1) 维生素 B1。维生素 B1 又称硫胺素,可以作为其他酶的辅酶,还可以维持神经、肌肉特别是心肌的正常功能以及维持正常食欲、胃肠道的蠕动和消化液的分泌。它还是一种抗脚气病、抗神经炎的药物因子,是人体所必需的维生素之一。

2009 年,首都师范大学赵国忠研究小组用 THz-TDS 技术对维生素 B1 进行测量^[25],并计算获得维生素 B1 的光谱信息。结果表明,在 0.2~2.6 THz 波段维生素 B1 共有 4 个明显的吸收峰,分别为 0.82 THz,1.11 THz,1.50 THz 和 1.70 THz,折射率在 1.90~2.10 之间变化。

2) 维生素 B2。维生素 B2 又称核黄素,其作为辅酶 FMN 和 FAD 以及共价键结合的黄素前体,是体内多种氧化酶系统不可缺少的辅酶,可催化许多氧化还原反应,促进糖类、脂肪及蛋白质代谢。此外,它还能激活维生素 B6,参与色氨酸转化为烟酸,而且与体内铁的吸收、储存与动员有关。由于这种维生素在体内不能自动生成,只有通过食物才能获得,因此引起了人们的关注。

2008 年,浙江大学的颜志刚等用 THz-TDS 技术进行维生素 B2 的测量^[26],得到维生素 B2 在 0.2~2.0 THz 波段的吸收系数和折射率;时隔 1 年,首都师范大学研究小组对维生素的测量给出了频谱更宽的吸收谱信息,发现低频部分微弱的峰能够被检测到。检测结果表明维生素 B2 有 8 个明显的吸收峰,分别为 0.38 THz,0.62 THz,0.82 THz,1.02 THz,1.17 THz,1.52 THz,1.93 THz 和 2.42 THz,其折射率在 1.22~1.31 之间变化。

3) 维生素 B3。维生素 B3 又称烟酸,为无色晶体,溶于水和乙醇,对光、热、空气和碱都不敏感。其主要生理功能是作为辅酶 NAD 和 NADP 的组成成分,在许多生物体内的氧化还原反应中起氢供体或电子受体的作用,它们在糖酵解、脂肪合成和呼吸作用中起着重要的作用。此外,它还是癞皮病防治的药物因子。

2008 年,浙江大学研究小组用 THz-TDS 技术对维生素 B3 进行了太赫兹光谱研究^[26],并计算出其在 0.2~2.0 THz 波段有 3 个明显的吸收峰,分别为 1.39 THz,1.72 THz 和 1.85 THz。由此看出无论是峰的位置还是峰的多少都有别于其他维生素,可以作为检测的依据。

4) 维生素 B6。维生素 B6 又称吡哆素,在室温下为无色晶体,易溶于水,微溶于乙醇,极微溶或不溶于氯

仿。其生理功能中最重要的方面是以 PLP 及 PMP 的形式作为辅酶参与蛋白质、糖类化合物、神经传递质和脂质的代谢。此外,脑和其他组织中的能量转化、核酸代谢、内分泌系统、辅酶 A 的生物合成以及草酸盐转化为甘氨酸等过程也都需要维生素 B6。

2009 年,首都师范大学赵国忠研究小组在 THz-TDS 系统下测量了维生素 B6 的太赫兹光谱^[25],结果显示在 1.71 THz 处维生素 B6 有一个明显的吸收峰,可以作为 THz 光谱检测食品中维生素 B6 的潜在应用。

5) 维生素 B12。维生素 B12 又叫钴胺素,其主要生理功能是参与制造骨髓红细胞,防止恶性贫血和大脑神经受到破坏;还能作为甲基转移酶的辅因子,参与蛋氨酸、胸腺嘧啶等的合成,保护叶酸在细胞内的转移和贮存。

2009 年首都师范大学的于斌等人对维生素 B12 做了光谱检测^[27],它并不像其他维生素一样有明显的吸收峰,只是吸收系数随频率的增加呈上升趋势,在低频段又显示出吸收几乎不变的特性。如果维生素 B12 中加入上述的任何一种维生素,它的无峰特性就会被打乱,从而肯定了其不是纯品。在此基础上,可继续开展有关维生素的结构与功能的太赫兹光谱分析研究。

3 总结与展望

太赫兹时域光谱技术在食品添加剂检测方面已经得到了一定程度的发展。不同食品添加剂在太赫兹波段的吸收谱有其独特的性质,这是运用光谱法鉴别物质的依据。太赫兹时域光谱技术在食品添加剂的检测与分析方面有一定的优势,一方面它不但可以检测食品添加剂的吸收谱特性,而且还可以检测其折射率谱或色散性质;另一方面太赫兹光谱反映的是物质内部分子集体振动或转动的特征行为,具有更丰富的物理和化学机理信息。运用太赫兹光谱技术检测和分析食品添加剂的成分与含量,有望在食品安全和物质鉴定领域发挥作用。

但是,从实际应用的角度来考虑,太赫兹光谱检测依然存在问题。首先,太赫兹时域光谱系统的测量需要对样品进行前期处理,即压片过程比较复杂,样品用量较大,工作较耗时;其次,目前太赫兹光谱检测的有效频率范围还很窄,很多物质在此范围内没有明显的特征峰,简单的光谱特征识别存在一定的困难,那么太赫兹时域光谱系统的测量波段需要进一步拓展;再次,微痕元素的测量还存在一定的局限性,不仅需要新算法的开发,更需要提高当前太赫兹时域光谱系统的信噪比、分辨率、稳定性,更精确地提取样品光学特性。

最后,太赫兹光谱技术最终要面向市场,有必要进一步小型化和智能化。食品添加剂的太赫兹光谱现场检测与分析,有着广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 张存林,牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010,47(2):023001-1-14. (ZHANG Cunlin,MU Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010,47(2):023001-1-023001-14.)
- [2] 食品安全国家标准食品添加剂使用标准:GB2760-2011[S]. 北京:中国质检出版社, 2011. (National food safety standards of food additives using standard:GB2760-2011[S]. Beijing:China Zhijian Publishing House, 2011.)
- [3] 彭亚锋,巢强国,葛宇,等. 食品添加剂检测技术的研究进展[J]. 粮油加工, 2009(10):138-140. (PENG Yafeng,CHAO Qianguo,GE Yu,et al. The research progress of the detection technology of food additive[J]. Cereals and Oils Processing, 2009(10):138-140.)
- [4] FERGUSON B,ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002,1(1):26-33.
- [5] BEARD M,TURNER G M,SCHMUTTENMAER C A. Size dependent photoconductivity in CdSe nanoparticles as measured by time-resolved THz spectroscopy[J]. Nano Letters, 2002,2(9):983-987.
- [6] 孟田华,赵国忠. 太赫兹时域光谱技术[J]. 山西大同大学学报, 2007,23(3):14-17. (MENG Tianhua,ZHAO Guozhong. Terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Shanxi Datong University, 2007,23(3):14-17.)
- [7] 刘庆,王凡余,杨中军. 食品中三聚氰胺检测方法的研究进展[J]. 生命科学仪器, 2014(1):21-24. (LIU Qing,WANG Fanyu, YANG Zhongjun. Research progress on detection methods of melamine in food[J]. Life Science Instruments, 2014(1):21-24.)
- [8] 朱莉,张光新,曹丙花,等. 苏丹红 1 号的太赫兹光谱研究[J]. 传感技术学报, 2008,21(1):83-87. (ZHU Li, ZHANG Guang xin,CAO Binghua,et al. Terahertz spectrum of Sudan I[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008,21(1):83-87.)
- [9] MITTLEMAN D M,BARANIUK R G,DORNEY T D. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2001,18(7):1562-1571.
- [10] 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, 2002,2(3):739-746.
- [11] 李建蕊,李九生,赵晓丽. 太赫兹时域光谱技术快速定性检测奶粉中的三聚氰胺[J]. 中国计量学院学报, 2009,20(2):

- 131-134. (LI Jianrui, LI Jiusheng, ZHAO Xiaoli. Study on rapid detection of melamine compositions by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(2): 131-134.)
- [12] 周小柳, 唐忠锋, 王继虎, 等. 三聚氰胺和三聚氰酸的太赫兹光谱研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15120-15122. (ZHOU Xiaoliu, TANG Zhongfeng, WANG Jihu, et al. Terahertz spectroscopic study on melamine and cyanuric acid[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(31): 15120-15122.)
- [13] HE M X, HAN J G, LI M, et al. Terahertz spectroscopy studies of far-infrared optical and dielectric signatures of melamine[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 09(S1): 0507-1-0507-3.
- [14] HE M X, LI M, TIAN Z, et al. Terahertz spectral properties of melamine and its deuterated isotope, melamine-d₆[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(4): 209-214.
- [15] CUI Y, MU K J, WANG X, et al. Measurement of mixtures of melamine using THz ray[J]. Proc. of SPIE, 2009, 7385: 73851E-73851E-9. doi:10.1117/12.835293.
- [16] BAEK S H, LIM H B, CHUN H S. Detection of melamine in foods using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(24): 5403-5407.
- [17] 李淑丽, 柳青松. 面粉中过氧化苯甲酰的作用与危害[J]. 广东化工, 2011, 9(38): 96. (LI Shuli, LIU Qingsong. The role and endangerment of the Benzoyl Peroxide in wheat flour[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 9(38): 96.)
- [18] 秦建平, 牛波, 张元, 等. 太赫兹波谱检测面粉增白剂的研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(2): 39-41. (QIN Jianping, NIU Bo, ZHANG Yuan, et al. Research on detecting flour brightener by terahertz spectrum[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21(2): 39-41.)
- [19] 付秀华, 李闻达, 李向军, 等. 小麦粉中掺杂滑石粉的太赫兹光谱检测[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(3): 110-122. (FU Xiuhua, LI Wenda, LI Xiangjun, et al. The detection of Talc in wheat powder based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(3): 110-122.)
- [20] 张曼, 蔡禾, 沈京玲. 食品添加剂特丁基对苯二酚的太赫兹光谱及其检测分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1809-1813. (ZHANG Man, CAI He, SHEN Jingling. Terahertz spectroscopic testing of food additive Tert-Butylhydroquinone[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7): 1809-1813.)
- [21] 曹丙花, 张光新, 侯迪波, 等. L-抗坏血酸的太赫兹波时域光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1729-1731. (CAO Binghua, ZHANG Guangxin, HOU Dibo, et al. Terahertz time-domain spectroscopy of L-Ascorbic acid[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(7): 1729-1731.)
- [22] NISHIKIORI R, YAMAGUCHI M, TAKANO K, et al. Application of partial least square on quantitative analysis of L-, D-, and DL-tartaric acid by terahertz absorption spectra[J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 2008, 56(3): 305-307.
- [23] 梁承森, 赵国忠. 木糖醇和 D-木糖的太赫兹光谱检测与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 323-327. (LIANG Chengsen, ZHAO Guozhong. Terahertz spectroscopic inspection and analysis of Xylitol and D-Xylose[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 323-327.)
- [24] 赵国忠, 梁承森. 甜味剂木糖和木糖醇的太赫兹光谱特性研究[C]// 第二届全国生命科学仪器研究与进展学术研讨会. 贵阳, 中国: [s.n.]: 2009: 32-36. (ZHAO Guozhong, LIANG Chengsen. Terahertz spectroscopic study of Sweeteners and Xylitol[C]// 2nd annual workshop of research and progress on life science instruments. Guiyang, China: [s.n.]: 2009: 32-36.)
- [25] ZHAO G Z, YU B, ZHANG C L. Terahertz spectroscopic investigation of four kinds of vitamins[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(10): 104702-104702-5.
- [26] 颜志刚, 侯迪波, 曹丙花, 等. 核黄素和烟酸的太赫兹光谱研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(5): 326-329. (YAN Zhigang, HOU Dibo, CAO Binghua, et al. Terahertz spectroscopic inspection of Riboflavin and Nicotinic acid[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(5): 326-329.)
- [27] 于斌, 黄振, 王晓燕, 等. B 族维生素的太赫兹光谱研究[J]. 光学学报, 2009, 29(S1): 254-257. (YU Bin, HUANG Zhen, WANG Xiaoyan, et al. Study on THz spectra of Vitamin B+[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(S1): 254-257.)

作者简介:



刘 英(1989-), 女, 山西省晋中市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光谱。
email: liuying3941@126.com.

赵国忠(1964-), 男, 呼和浩特市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像、光电功能材料与器件和光电子学等。