

太赫兹波谱无损检测技术研究进展*

谢丽娟 徐文道 应义斌 秦坚源

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 太赫兹由于具有透视性、安全性和波谱分辨能力的特点,近年来得到了较快的发展和应用,成为无损检测的新技术,并被应用于国防、工业、半导体、通信、生物医学、制药、农产品及食品等多个领域。首先介绍了太赫兹波谱技术和成像技术的原理和特点,阐述了太赫兹技术在非金属材料特性和缺陷检测中的应用,并重点分析了近年来太赫兹技术在农产品及食品领域的应用新进展。最后,分析了太赫兹波谱无损检测技术的难点及问题,并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 太赫兹 波谱 成像 无损检测

中图分类号: TN29; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0246-10

Advancement and Trend of Terahertz Spectroscopy Technique for Non-destructive Detection

Xie Lijuan Xu Wendao Ying Yibin Qin Jianyuan

(College of Biosystem Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: There has been a series of significant advances and applications in terahertz (THz) technologies which processes perspectivity, safety and spectroscopic fingerprinting ability. The unique properties of THz waves make them become tools for non-destructive detection and application in the fields of defense, industry, semiconductor, communication, biological medicine, pharmaceutical, agro-products, food and etc. Firstly, the principle and feature of THz spectroscopy and imaging techniques were introduced. Then, the non-metallic material characterization and defect inspection in foam and fiber composites were stated. The recent application of THz in agro-products and food was introduced mainly. Finally, the technology difficulties and issues of the THz technologies were analyzed, and their development prospects in the non-destructive detection field were presented.

Key words: Terahertz Spectroscopy Imaging Non-destructive detection

引言

太赫兹(Terahertz, THz)辐射是对一个特定波段的电磁辐射的统称。它在电磁波谱中位于微波和红外辐射之间,一般所谓的太赫兹波段,其频率范围为0.1~10 THz^[1-2]。自然界中拥有大量的太赫兹辐射源,但是在20世纪80年代中期之前,由于缺乏太赫兹波段高效率的发射源和灵敏的探测器,这一波

段的电磁辐射并未得到深入研究,只有极少量的技术和应用,因此,太赫兹波段成为宽广的电磁波谱中一段不为人熟悉的“空白”,被称为电磁波谱的“太赫兹空隙”^[3-5]。近20年来,超快光电子技术和低尺度半导体技术的发展为太赫兹波段提供了合适的光源和探测手段,太赫兹科学和技术才得以快速发展^[2]。

太赫兹技术研究受到各国的重视。2004年,美

收稿日期:2013-05-01 修回日期:2013-05-21

* 国家自然科学基金资助项目(31000668)

作者简介: 谢丽娟,副教授,博士生导师,主要从事基于波谱技术的农产品/食品品质与安全无损检测研究,E-mail: ljxie@zju.edu.cn

通讯作者: 应义斌,教授,博士生导师,主要从事农产品品质与安全快速检测技术和智能装备研究,E-mail: yingyb@zju.edu.cn

国政府将太赫兹科技列为“改变未来世界的十大技术”之一。日本政府近年来对太赫兹科研的投入经费每年都超过一千万美元,于 2005 年 1 月 8 日将太赫兹科技列为“国家支柱技术十大重点战略目标”之首。欧洲、亚洲、澳大利亚等许多国家和地区的政府、企业、大学和科研机构等也纷纷投入到太赫兹的研发之中。我国政府在 2005 年 11 月专门召开了“香山科技会议”,确立了太赫兹技术的战略地位,并制定了我国太赫兹技术的发展规划。目前,太赫兹在化学、波导、石油、天然气、国防、半导体、生物医学、成像、显微术等领域发挥着重要作用,图 1 显示了电磁辐射波谱和应用领域^[6-9]。

太赫兹波之所以受到人们的关注,在于其具有很多重要的性质。① 透视性:太赫兹辐射对于很多介电材料和非极性的液体具有良好的穿透性,能对不透明的物体进行透视成像;它的一个非常有吸引力的应用前景就是作为 X 射线成像和超声波成像等技术的补充,用于安全检查或者质量控制过程中的无损探伤^[2]。② 安全性:太赫兹辐射的光子能量只有毫电子伏的数量级,不会引起有害的电离反应;

此外,由于水对太赫兹波的强烈吸收,太赫兹辐射不能穿透人体的皮肤,太赫兹辐射对人体的影响只停留在皮肤表层^[2]。③ 波谱分辨能力:大量的分子,尤其是有机分子,由于其转动和振动(包括集体振动)能级之间的跃迁,在这一频段表现出强烈的吸收和色散特性;分子的这些特征谱线结构可以用于样品的鉴别;太赫兹波的波谱分辨能力使得太赫兹探测技术不但能够辨别物体的形貌,而且能够鉴别物体的组成成分^[2,10]。太赫兹波的这些特性成为其进行无损检测的一大优势。无损检测是指在不损害检测对象性能的前提下对特定对象进行检测,因此被用于不同领域^[11-12]。关于太赫兹技术在纳米材料^[13]、国防^[14]、工业^[15]、半导体^[16]、通信^[17]、生物医学^[18-19]、制药^[7,20]、成像^[15,21]、农产品^[22]及食品^[10]方面的应用,已有较多的文献介绍和总结过,本文就太赫兹技术在非金属材料特性和缺陷检测中的应用进行重点介绍,并补充 2012 年以来太赫兹技术在农产品及食品领域的新进展,最后提出目前存在的主要问题和关键技术难点,并对其发展趋势进行展望。

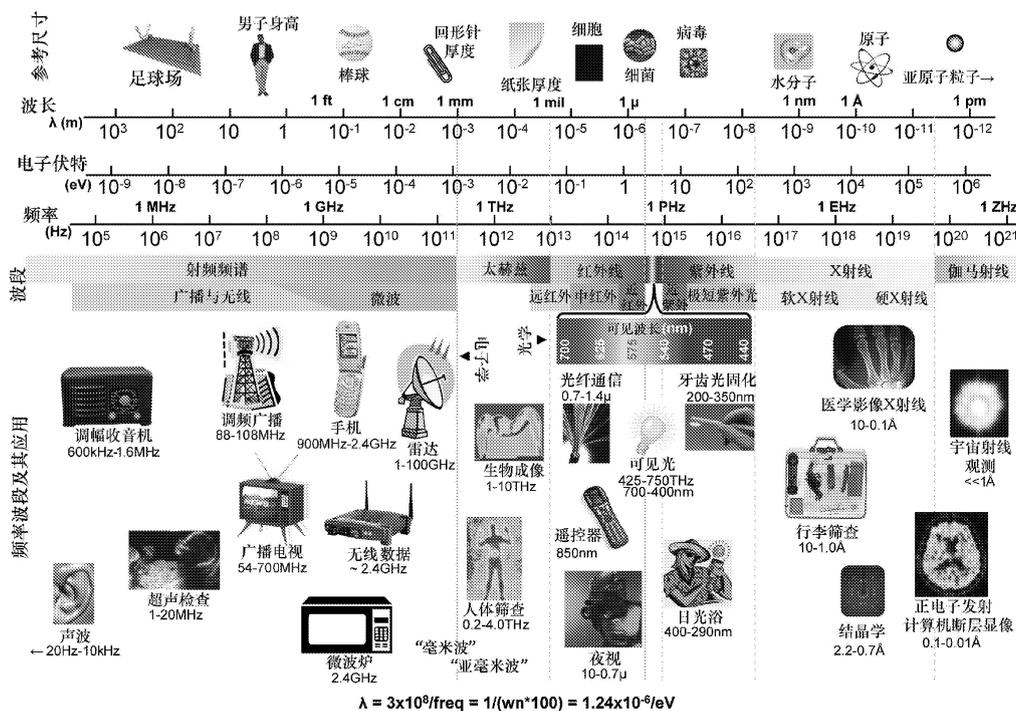


图 1 电磁辐射波谱和应用领域

Fig. 1 Electromagnetic spectrum and their applications

1 太赫兹技术无损检测原理

与其它波段的电磁波相比,太赫兹电磁波具有低能性、高穿透性、瞬态性、宽带性、相干性和指纹谱性等特性^[9],这使得太赫兹技术在很多方面可以成为傅里叶变换红外光谱技术和 X 射线技术的互补技术。从而使 THz 电磁波在很多基础研究领域、工

业及军事领域有重要的应用。

1.1 太赫兹时域波谱技术

太赫兹波谱技术可以得到物质在远红外的光学特性,即关于频率的一个函数。而这个信息能够反映物质的特性,故具有很大的应用潜力。太赫兹波谱技术包括 3 种形式:太赫兹时域波谱(Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)、太赫兹时间分

辨波谱 (Time-resolved terahertz spectroscopy, TRTS) 和太赫兹发射波谱 (Terahertz emission spectroscopy, TES)^[23]。这 3 种光谱技术具有各自的特点, THz-TDS 用于确定样品的复介电常数, 能提供样品的静态特性, 主要应用在化学、医学和生物方面的检测及品质控制, 其应用最为广泛; TRTS 测量的是材料的动态和形成特性, 它的一个重要应用是在半导体学中; TES 则是通过分析 THz 发射波的形状和振幅来研究样品 (如半导体、超导体等) 的特性^[24]。

THz-TDS 技术是 20 世纪 90 年代由 AT&T Bell 实验室和 IBM 公司的 Watson 研究中心发展起来的一种相干探测技术^[25-26], 它能够同时获得 THz 脉冲的振幅信息和相位信息。THz-TDS 系统的典型光路主要有 4 种: 透射型光路、反射型光路、差异型光路和啁啾展宽型光路。

以透射型光路 THz-TDS 系统为例介绍太赫兹脉冲测量的原理。如图 2 所示, 飞秒脉冲经分束镜后分为两束: 泵浦光和探测光^[24]。其中一束作为泵浦光, 入射到太赫兹发射器上 (如光电导天线、半导体晶片、非线性晶体等), 产生太赫兹脉冲, 此脉冲被抛物面镜聚焦到待测样品上。分束镜分出的另一束为探测光, 它和从样品透射后载有样品信息的太赫兹电磁脉冲共线经过探测器 (如 GaAs 光电导开关或电光晶体), 测量探测光偏振态的变化即可得到载有样品信息的太赫兹脉冲电场的信息, 然后经过锁相放大器放大后输入计算机进行处理^[27]。通过控制电动平移台来调整太赫兹脉冲与探测光之间的相对光程差, 通过逐点扫描得到太赫兹脉冲的整个时域波形。对太赫兹时域波形进行傅里叶变换, 获得太赫兹波频谱, 对其频谱数据进行分析和处理, 即可获得被测样品介电常数、吸收系数和载流子浓度等重要物理信息。

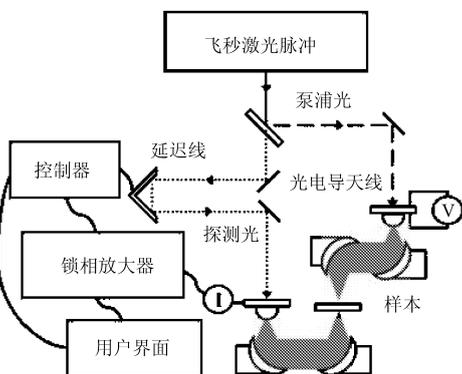


图 2 使用光电导天线的典型 THz-TDS 透射系统原理图

Fig. 2 Schematics of typical transmission spectrometer configuration for THz-TDS with photoconductive antennas

1.2 太赫兹成像技术

无损检测技术的很多应用需要用到成像技术,

太赫兹成像技术在无损、非接触检测上具有很大的潜力^[28]。太赫兹成像技术是基于时域光谱技术发展起来的^[29], 自美国的 Hu 等^[30] 在 1995 年首次建立第一套太赫兹成像装置以来, 世界各地的研究小组相继开展了各种太赫兹成像技术的研究, 包括太赫兹扫描成像、太赫兹实时成像、太赫兹层析成像、太赫兹近场成像。下面以太赫兹扫描成像为例介绍其原理。

基于 THz-TDS 系统的原理, 太赫兹扫描成像有两种方式: 透射型扫描和反射型扫描方式。太赫兹扫描成像系统主要由以下几部分组成: 飞秒激光器; 时间延迟装置; THz 波发射元件; 由透镜或抛物面镜等构成的光学成像系统; 被测样品; THz 探测元件; 扫描器, 用于把 THz 射线频率转换为声音频率, 以便后期信号处理; 数字信号处理器, 用于信号处理、降噪等功能。其具体光路如图 3 所示, 超快激光脉冲经过偏光分束镜分为两束。一束作为泵浦光, 入射到太赫兹发射器上, 产生太赫兹脉冲, 此脉冲被抛物面镜聚焦到要测量的样品上。分束镜分出的另一束为探测光, 它和从样品透射后载有样品信息的太赫兹电磁脉冲共线经过探测器。调整时间延迟装置, 利用不同的探测光到达时间, 测量太赫兹电场强度的变化量, 再通过傅里叶变换, 获得频域上幅度和相位的变化量; 最后信号经电流前置放大器、数字信号处理器后输入计算机, 进行图像还原。实验过程中被测样品被放置在一个 X-Y 的移动台上, 可以随时改变样品方位, 使太赫兹射线通过物体的不同点, 可记录下样品不同位置的透射信息, 包括振幅信息和相位信息等。反射型系统的基本原理与透射型相同, 试验装置也基本相同, 不同的是从物体反射回来的波被用来作为成像信息。

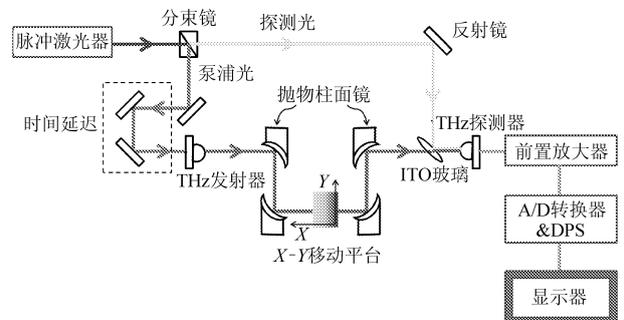


图 3 太赫兹扫描成像系统原理图

Fig. 3 Schematics of THz imaging system

目前实现实时成像的主要方法是利用光电晶体和 CCD 成像^[31] 以及利用啁啾脉冲技术成像^[32]。太赫兹层析成像技术^[33] 是利用太赫兹射线对一个立体的物体进行立体分层成像, 在对某一特定层面成像的同时要将其他部分的信号变模糊, 尽量不干

扰所要的特定层的信息。待测物体放置在旋转平台上,平台能绕轴旋转,能在每一个投影角度获得二维太赫兹图像。结合计算机技术,这种方法使太赫兹成像能够描绘出被测物体的三维立体结构。太赫兹近场成像是提高太赫兹成像空间分辨率的有效途径。一般通过把具有亚波长孔径的合金做成尖锥形结构^[34]应用到成像系统中,或者是通过将探测器和样品靠近^[35]来实现。

2 太赫兹技术在非金属材料无损检测中研究进展

非极性和非金属材料,如纸、衣服、木头、陶瓷和塑料等在光学频段是不透明的,但对于太赫兹辐射而言是透明的,通过分析太赫兹脉冲透过物质前后波形的变化或进行太赫兹成像就可以实现无损检测^[36]。除了能实现基本材料特性检测和过程控制外,太赫兹系统在塑料等非金属成分的无损、非接触式检测上发挥着重要作用^[28]。

2.1 树脂检测中的应用

环氧树脂具有优异的粘接力、力学性能、电性能、耐腐蚀性和耐热性等优点,因此对其进行研究具有重要意义^[37]。2011年,苗青等^[37]采用 THz-TDS 技术研究了4种不同环氧值的环氧树脂在0.2~2.6 THz 波段的光学性能和光谱特性,并基于这4种环氧树脂吸收谱对3种环氧树脂混合物的吸收光谱进行了分析,证实了太赫兹波谱技术在定量分析领域潜在的应用前景。2012年,Macutkevic 等^[38]研究了环氧树脂与多种碳杂质混合物的太赫兹波透射性质,发现在0.2~1.5 THz 范围内,随着频率增高,辐射强度明显减少。Peters 等^[39]将多层碳纳米管(Multi-walled carbon nanotubes)固定在树脂薄膜上,并利用 THz-TDS 技术以及成像技术进行分析。通过对时域谱分析得到了碳纳米管浓度(浓度范围为0.1%~1%)与消光系数、折射率之间的关系,并讨论了碳纳米管均匀度的影响。通过太赫兹成像可以明显看出浓度的分布情况,尤其是能检测低浓度的部分,这为碳纳米管的质量检测提供了依据。

2.2 陶瓷检测中的应用

2001年,Brucherseifer 等^[40]用时间分辨的太赫兹断层摄影技术系统对薄层陶瓷氧化膜进行三维成像分析。经过对入射角度的一系列调整,发现在布儒斯特角下,该系统的性能得到了较大提高。该断层摄影技术可以用在高温固体氧化燃料电池中。2002年,Pashkin 等^[41]利用 THz-TDS 技术以及逆波振荡器技术对铁电陶瓷,如掺镧锆钛酸铅陶瓷(PLZT ceramic)、掺锌酸铅陶瓷(PZ ceramic)以及蓝

宝石上的钛酸锶钡薄膜进行分析。其中利用逆波振荡太赫兹波谱技术得到温度在10~300 K 下波数范围为8~33 cm^{-1} 的波谱,通过时域谱技术得到常温下波数为3~80 cm^{-1} 的光谱。以上两种技术对于 PLZT 和 PZ 陶瓷的测量能力近似,但是在测量对象为薄膜的情况下,时域谱技术因其处理数据选择性强而较逆波振荡技术更优。2006年,Reiten 等^[42]利用太赫兹脉冲进行陶瓷球轴承裂纹的检查,并用最迟脉冲响应和时域角度调制两种方法进行分析。利用太赫兹脉冲作为检测手段具有非接触、无损伤、无需液体介质并且对周围环境温度不敏感的特点。2011年,Owens 等^[43]利用太赫兹反射成像技术对陶瓷复合材料进行无损检测(分辨率小于1 mm),且该项技术可为材料性质因机械和热应变而导致太赫兹图像上的改变作依据。2012年,Trofimov 等^[44]利用太赫兹反射谱对不同遮蔽物下的陶瓷炸药(氧化铝与环三亚甲基三硝基胺或季戊四醇四硝酸酯的混合物)进行分析。分析不同反射角度下的太赫兹脉冲,发现遮蔽物能在一定程度下扭曲太赫兹光谱,但是对谱图和动态谱线的分析仍然能够得到相应的炸药信息。

2.3 塑料检测中的应用

塑料作为重要的工业材料,其内部存在的气泡或生产过程中带入的一些掺杂物会成为一种安全隐患。许多塑料对太赫兹波吸收不明显,甚至部分塑料(如聚乙烯)对太赫兹波的吸收接近零。因此,聚乙烯经常被作为太赫兹压片的稀释物而广泛使用^[45~48]。

2005年, Van der Valk 等^[49]运用太赫兹极性成像技术对一个塑料硬币进行了成像。2007年,Wietzke 等^[50~51]使用太赫兹连续波成像系统对塑料进行透射成像,在0.3 THz 频率下的透射太赫兹图像中,能够发现加劲肋、沙、纸质标签、塑料上一些较厚的区域及分层。同时他们还使用 THz-TDS 成像系统寻找出高密度聚乙烯的塑料焊接接头。2010年,王鹤等^[52]利用 THz-TDS 技术测量了聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚四氟乙烯和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的太赫兹透射谱,在频段为0.2~2.6 THz 范围内,得到了在室温氮气环境下这些材料的太赫兹吸收谱和折射率色散特性。发现这几种塑料的折射率与吸收系数差异显著,相比之下,聚氯乙烯和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的吸收较聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯高。2011年,Probst 等^[53]利用 THz-TDS 技术对聚乙烯管的厚度进行了分析。在反射时域图中,管的外壁与内壁反射的太赫兹波会形成两个脉冲峰,利用两个脉冲峰的时间间隔与聚乙烯管的厚度可以

建立一个对应关系。Pastorelli 等^[54]使用 THz-TDS 技术与脉冲成像技术测量已商品化以及有一定历史的塑料共 26 种,并对 3 个有一定历史的样本进行了三维成像。结果表明不同塑料的太赫兹谱不同,但无显著差异。聚氯乙烯中的增塑剂对太赫兹谱无明显影响,但是聚丙烯中填充物对太赫兹谱影响很大,这为填充物的检测提供了依据。同时,由于聚合物的物理和机械特性受含水量的影响,而太赫兹波又易被水所吸收,因此太赫兹在微量水分的变化检测上具有一定潜力^[55-57]。

2.4 纸张检测中的应用

由于纸张对太赫兹波的吸收较少,因此太赫兹波能够透过纸张(如牛皮纸、信封等)对纸张内部物质进行检测,尤其是检测危险物品如炭疽杆菌、毒品等^[58-61]。2006 年,Reid 等^[62]对云杉木和试镜纸在太赫兹波段下的双折射与衰减效应进行研究,发现双折射现象与云杉木及试镜纸中纤维的取向有关。由于太赫兹波会被水强烈吸收,且对纸表面散射不明显,可以用太赫兹技术对纸张中的水分含量进行测定。2008 年,Banerjee 等^[63]用太赫兹谱及成像技术对纸张中的水分含量进行了分析(样品的含水量检测均指低含水量的样品)。他们利用低太赫兹频率下消光以及相位的测量来对纸张含水量进行定量分析建模,实验表明,在 0.6 THz 下,从太赫兹图像中可以较明显地看出纸张含水量的改变。2012 年,Siemon 等^[64]用一般的纸制造出了可以适用于太赫兹频段下的衍射透镜,与先前其他材质的衍射透镜相比更便宜,制作周期更短。2013 年,Trafela 等^[65]用 THz-TDS 技术对 250 张 16 世纪的纸进行了波谱采集,并用偏最小二乘法对木素含量、抗拉强度和灰分含量进行了建模,发现所建模型对灰分含量预测效果最好,校正集的决定系数为 0.87,预测集的决定系数为 0.82。这项研究显示了太赫兹波谱技术定量分析大分子物质的潜力,而且该技术对被检测物无损伤。

3 太赫兹技术在缺陷无损检测中的研究进展

太赫兹辐射对于大部分低含水量、介电材料和非极性液体具有较好的穿透能力,结合各种成像技术,能对多种材料与结构中的缺陷进行检测。

3.1 泡沫材料检测中的应用

2003 年 2 月 1 日,哥伦比亚号航天飞机失事,分析失事原因认为是航天飞机外挂燃料箱上的隔热泡沫块脱落并撞击到机翼,造成了航天飞机外壳上的破损。隔热泡沫块脱落的可能原因是该隔热材料中存在空洞或分层等缺陷。美国宇航局和外挂燃料

箱的生产厂家在尝试多种无损探伤技术后,认为太赫兹波和 X 射线背散射技术是最为有效的两种技术。由于泡沫和缺陷区域的差异会有折射系数的改变,因此太赫兹无损检测方法被认为是非常有前景的方法^[66]。泡沫材料的缺陷一般有分层、裂纹和空洞等^[67]。

2002 年,Zhao 等^[68]用 THz-TDS 技术对 3 种聚苯乙烯泡沫进行检测并分析,发现在 0.2 ~ 4 THz 范围内,该材料消光低,且有一个非常明显的低折射率(1.022 ~ 1.107)。对于掺了发泡剂的样品,可以从频域图中看出在 0.5 THz 有一个由分子的转动跃迁引起的吸收峰。由于聚苯乙烯泡沫的低消光和低折射率,该材料可作为二向色滤光片和太赫兹成像的基底。2010 年,Quast^[69]运用三维电场太赫兹成像技术(SynView 公司的连续太赫兹波成像系统)对泡沫结构进行分析(230 ~ 320 GHz),能发现人工设置的缺陷。2012 年,Roth^[70]等用太赫兹计算机断层扫描技术对 0.028 3 m³的航天飞机外部燃料箱热保护系统泡沫材料进行空隙以及撞击破坏的无损检测,并与微聚焦 X 射线断层扫描技术进行了比较,结果表明太赫兹计算机断层扫描技术对 10 ~ 50 mm 的缺陷检测效果良好,且比 X 射线更加安全。但是泡沫材料的特性给检测理论研究带来了一定的困难,如材料内部含有大量充气微结构,此结构大小可能与太赫兹波长同一数量级^[71],这样容易产生强烈的散射效应,影响太赫兹脉冲的传播。另外,泡沫中层与层之间会产生熔合线(Knit line),它们会使相位消除现象变得不明显,甚至消失^[72],这从一定程度上增加了分析的难度。以上这些问题的解决目前主要依赖于数据处理方法,但尚未有成熟的模型和数据解析方法。2006 年,Chiou 等^[72]利用太赫兹成像技术对航天飞机外部燃料箱泡沫进行了缺陷检测实验。他们分析了不同种缺陷,通过使用新的信号处理和建模方法实现对缺陷的检测。Banks 等^[73]对带有熔合线的聚氨酯泡沫板进行了太赫兹脉冲仿真及检测,使用二位麦克斯韦方程组的横电模式建立法向入射的太赫兹平面波脉冲在聚氨酯泡沫中传播的模型,发现可以用经典的电磁学公式描述熔合线以及周围低密度的泡沫材料。Melapudi 等^[74]在模拟绝缘泡沫材料的脉冲太赫兹检测过程中,使用基于光学光纤追踪模型的近似方法,并制作了泡沫-空气-金属三层结构作为实验样本。

在利用脉冲太赫兹波成像检测泡沫材料缺陷的测试中,对于结构简单或较薄的泡沫样品的缺陷检出率接近 100%,对于复杂结构或较厚的泡沫样品的检出率达到 86%,而且在检验中没有假阳性^[2]。

3.2 纤维复合材料检测中的应用

纤维复合材料,如玻璃纤维、石墨纤维等有出色的力学特性,已被广泛应用于航空、航海和汽车制造等行业。对这些材料的特性以及缺陷的检测具有重要的意义,而纤维复合材料的无损检测是太赫兹技术发挥作用的另一个重要领域。

玻璃纤维对太赫兹几乎是透明的,可利用太赫兹技术对玻璃纤维化合物进行深入研究,检测样品是否有空隙、脱层以及力热损伤^[75]。同时,材料的力学特性与材料内添加纤维的比重及纤维的走向密切相关,可利用太赫兹技术对纤维含量和纤维走向进行监测,甚至可做到在加工过程中进行监测^[75]。2006年,Rutz等^[76]用THz-TDS技术以及成像技术对纤维走向不同的玻璃钢样品进行了检测与成像,发现其吸收系数与折射率偏差不大。太赫兹成像所用的频率分别为0.3~0.4 THz和0.5~0.75 THz,结果表明低频下的太赫兹图像不能看到玻璃钢的纤维走向,高频率下的太赫兹图像则可以分辨纤维走向。2010年,Jördens等^[77]利用THz-TDS技术对玻璃纤维走向以及纤维含量进行了测量与分析(0.1~1 THz),用Polder与van Santen建立的方法^[78]对添加剂含量、最佳纤维取向角度及其百分比进行了推算,与商业软件结果吻合很好。2012年,Nezadal等^[79]在低太赫兹频段下(220~325 GHz)对玻璃纤维增强塑料进行综合孔径雷达成像分析,检测不同大小和深度的人造缺陷,能检测到的缺陷最小直径为0.8 mm。

石墨纤维复合材料是飞行器制作中一种非常常用的材料,它是以石墨纤维为骨架填充树脂材料制成的。这种材料的优点是轻且坚固,缺点是被加热到超过200℃时容易损坏。因此,探测石墨纤维复合材料的受热损坏程度是非常重要的。2007年,Karpowicz等^[80]将太赫兹技术引入纤维复合材料的无损检测中,对被火烧过的碳纤维化合物成像以确定损伤程度,由于石墨纤维是导电材料,对太赫兹辐射不透明,对太赫兹波吸收较强,因此,采用了反射式成像方式进行检测。Zhang^[81]和Redo-Sanchez^[82]等均用太赫兹连续波成像系统及THz-TDS系统对灼烧以及未灼烧的石墨纤维复合材料进行分析。在石墨纤维的太赫兹成像上可以明显区分出被灼烧的区域,在时域波谱中,被灼烧过的石墨纤维的太赫兹脉冲减弱很多,相应的在频域图中两者也有区别。2012及2013年,Im等^[83-84]对碳纤维复合塑料与热塑性聚苯硫的复合板进行了太赫兹透射光谱与反射光谱的检测,发现碳纤维复合材料的导电性与单方向的纤维有关。同年,Park等^[85]也对该复合材料的

纤维方向进行了研究。2009年,Dong等^[86]利用THz-TDS系统,在0.165~1.2 THz范围内,检测了碳纤维增强塑料的偏振相关损耗。2013年,Yang等^[87]利用毫米波(65~67 GHz)在不同角度下,对不同程度冲击损坏的碳纤维增强塑料进行检测分析,发现当电场方向与碳纤维方向平行时,用毫米波检测其损坏是可行的。

4 太赫兹技术在农产品/食品无损检测中的最新研究进展

在农产品/食品领域的无损检测中,许多光谱技术已经得到了广泛应用,包括红外光谱技术和拉曼技术等。太赫兹技术在该方面的应用起步相对较晚,进展也相对较少,主要用于农产品和食品的质量检测和安全控制,研究对象主要有食用油、谷物、奶粉、巧克力、番茄等,关于这方面研究进展的介绍详见文献[10, 22],本文主要补充以上文献发表后这方面的最新研究进展。

在检测新装置方面,Saha等^[88]提出了一种用于生物样品THz检测的装置和方法。该装置主要包括傅里叶变换红外光谱系统和一个硅微流控光栅结构,主要用于液态样品2~5.5 THz范围内复介电函数的测量。以蔗糖、鲑鱼DNA、鲱鱼DNA和牛血清蛋白的水溶液为研究对象,结果表明,该装置增强了样品的透射特性,从而提高了检测精度并增加了带宽。

在农产品/食品安全检测方面,Hao等^[89]利用THz-TDS技术在室温下对两种杀虫剂(伏虫脲和氟氯氰菊酯)进行了谱分析,并用泛函数密度理论模拟方法验证检测结果。结果发现:这两种杀虫剂在0.2~2.2 THz内出现了特征吸收峰,说明该方法可以用于农产品或食品中农药残留的检测。理论模拟结果发现,固态模拟较独立分子的模拟效果好,与实验结果一致。廉飞宇等^[90]利用太赫兹波谱技术测量了大豆油和地沟油在0~3.0 THz范围内的时域谱和频域吸收谱,分析结果发现两种油在太赫兹波段的特征有显著不同,会随着频率的增加而变化,此研究对检测地沟油有着重要的意义。

在农产品/食品品质检测方面,戚淑叶^[91]等以核桃为研究对象,联合使用反射式和透射式THz-TDS系统获取虫蛀、霉变、正常核桃壳和核桃仁样品的不同反射率和吸收系数,通过分析发现变质与正常核桃谱图及吸收光谱存在差异,解决了变质核桃的剔除问题和核桃壳厚的分级问题,为进一步探讨THz-TDS技术无损检测核桃品质的应用打下了基础。Jiang等^[92]尝试用太赫兹技术快速确定蔬

菜油和鱼油中的皂化值和聚合物含量。研究发现在 $20 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,可以发现 77 和 328 cm^{-1} 处有两个吸收峰,前一个峰与皂化值有关,并且随着加热时间的增加吸收增大。热处理过的油中的聚合物含量与 77 cm^{-1} 处的吸收也有关系。该研究证实了太赫兹方法可用于确定食用油中的皂化值和聚合物含量,每个样品的测试时间只需 $2 \sim 3 \text{ min}$ 。

5 太赫兹无损检测的技术难点及前景展望

近5年,太赫兹技术得到了广泛的关注,可以预期它将进一步快速发展。太赫兹辐射作为一种具有多种独特特点的辐射源,显示出了巨大的开发和应用潜力,尽管在部分领域(如农业领域)的研究和应用才刚刚起步。随着研究的深入和广泛应用,太赫兹技术的优势逐渐体现出来,但在无损检测方面的应用仍然会有一些限制:首先,太赫兹辐射无法穿透导体;其次,由于极性液体中分子的转动和整体振动对太赫兹波有强烈的吸收,导致太赫兹辐射在极性液体(比如水)中穿透率非常低,如太赫兹波在液态水中透射深度在 $100 \mu\text{m}$ 数量级;再次,由于晶体的声子振荡能级位于太赫兹波段,因此它们对于太赫兹波在某些特定的波段存在强烈的共振吸收^[2,93]。同时,运用太赫兹成像技术进行无损检测,还需要满足以下两个条件:媒质对载波的损耗率必须较低,这样载波才能透过媒质看到内部结构;媒质对载波必须有一定的损耗,这样才能有足够的对比度。

从发展前景来看,今后的研究主要体现在以下方面:

(1)太赫兹技术向着快速、稳定的趋势发展,其设备价格也会相应降低:这涉及太赫兹系统构建的许多细节,如提升激光稳定性、整个系统可靠性及系统维护等。

(2)快速鉴别与定量检测:许多物质在太赫兹波段下具有特征峰,可以依据太赫兹波这个特点对物质进行快速鉴别以及对物质含量进行分析。

(3)弱信号的处理:目前对于材料的分析,如内部结构、缺陷、密度分布、含水量及内部分子反应等,都因信号强度较弱而存在分析困难的问题,相信随着技术的进步及数据处理方法的成熟,弱信号的处理问题将得到解决。

(4)检测速度提高:阻碍太赫兹波检测实用化的其中一个因素是太赫兹成像的速度。由于太赫兹成像技术一般是逐点进行采样的,其成像的速度受到一定限制,很难获得高的扫描速度,因此在实际生产线上应用相对较少。但是随着检测方法与硬件的改良和发展,太赫兹成像系统会越来越小型化和轻型化,成像速度会越来越快,并广泛应用于实际流水线检测。

(5)多技术融合:将太赫兹技术与其他技术进行融合,如生物传感技术^[94],发挥各个技术的长处使检测功能更加完善。

目前,太赫兹技术正处于从技术推广到市场驱动的转折点,需要持续发展克服瓶颈问题的突破性技术以满足市场的真正需求^[95]。相信在不久的将来,太赫兹技术的优势能被充分利用,其设备真正实现市场化和产业化。

参 考 文 献

- Abbott D, Zhang X C. Scanning the issue: T-ray imaging, sensing, and detection[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1 509 ~ 1 513.
- 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
- Sirtori C. Bridge for the terahertz gap[J]. Nature, 2002, 417(6885): 132 ~ 133.
- Won R. Bridging the terahertz gap[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 673 ~ 674.
- Mantsch H H, Naumann D. Terahertz spectroscopy: the renaissance of far infrared spectroscopy[J]. Journal of Molecular Structure, 2010, 964(1): 1 ~ 4.
- Stoik C, Bohn M, Blackshire J. Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy[J]. Nondestructive Testing and Evaluation International, 2010, 43(2): 106 ~ 115.
- Shen Y C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: a review[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 417(1 ~ 2): 48 ~ 60.
- Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. Optics Express, 2003, 11(20): 2 549 ~ 2 554.
- 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展和在雷达和通讯系统中的应用[J]. 微波学报,2010,26(6): 1 ~ 6.
Zheng Xin, Liu Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system[J]. Journal of Microwaves, 2012, 26(6): 1 ~ 6. (in Chinese)
- Gowen A A, O'Sullivan C, O'Donnell C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: emerging techniques for food process monitoring and quality control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 25(1): 40 ~ 46.
- McCann D M, Forde M C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures[J]. Nondestructive

- Testing and Evaluation International, 2001, 34(2): 71 ~ 84.
- 12 Zhu Y K, Tian G Y, Lu R S, et al. A review of optical NDT technologies[J]. *Sensors*, 2011, 11(8): 7 773 ~ 7 798.
- 13 Lee Y S. Introduction to the special issue on “terahertz spectroscopy of carbon nanomaterials”[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, 33(8): 795 ~ 796.
- 14 Wang G, Xu D, Yao J. Review of explosive detection using terahertz spectroscopy technique[C]//2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011: V4 - 22 ~ V4 - 25.
- 15 Zeitler J A, Shen Y C. Industrial applications of terahertz imaging[M]//Peiponen K-E, Axel Zeitler, Makoto Kuwata-Gonokamied. *Terahertz Spectroscopy and Imaging*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 451 ~ 489.
- 16 Feng W. Review of terahertz semiconductor sources[J]. *Journal of Semiconductors*, 2012, 33(3): 031001 - 1 ~ 031001 - 4.
- 17 Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, 32(2): 143 ~ 171.
- 18 Pliński E, Plińska S. Sensing with terahertz radiation of pharma- and bio-materials[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 47: 929 ~ 932.
- 19 何明霞,陈涛. 太赫兹科学技术在生物医学中的应用研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(6): 471 ~ 483.
He Mingxia, Chen Tao. Application of terahertz science and technology in biology and medicine research[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(6): 471 ~ 483. (in Chinese)
- 20 Zeitler J A, Taday P F, Newnham D A, et al. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting—a review[J]. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2007, 59(2): 209 ~ 223.
- 21 Federici J F. Review of moisture and liquid detection and mapping using terahertz imaging[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, 33(2): 97 ~ 126.
- 22 Qin J, Ying Y, Xie L. The detection of agricultural products and food using terahertz spectroscopy: a review[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2013, 48(6): 439 ~ 457.
- 23 Pickwell E, Wallace V. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): R301 ~ R310.
- 24 Baxter J B, Guglietta G W. Terahertz spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(12): 4 327 ~ 5 026.
- 25 Grischkowsky D, Keiding S, Van Exter M, et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1990, 7(10): 2 006 ~ 2 015.
- 26 Auston D, Smith P. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 1983, 43(7): 631 ~ 633.
- 27 Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97 ~ 105.
- 28 Jansen C, Wietzke S, Peters O, et al. Terahertz imaging: applications and perspectives[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): E48 ~ E57.
- 29 Liu G. Visualization of patents and papers in terahertz technology: a comparative study[J]. *Scientometrics*, 2013, 94(3): 1 037 ~ 1 056.
- 30 Hu B, Nuss M. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1 716 ~ 1 718.
- 31 Wu Q, Sun F, Campbell P, et al. Dynamic range of an electro-optic field sensor and its imaging applications[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(23): 3 224 ~ 3 226.
- 32 Jiang Z, Zhang X C. Measurement of spatio-temporal terahertz field distribution by using chirped pulse technology[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(10): 1 214 ~ 1 222.
- 33 Ferguson B, Wang S, Gray D, et al. T-ray computed tomography[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1 312 ~ 1 314.
- 34 Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1): 22 ~ 26.
- 35 Bitzer A, Ortner A, Walther M. Terahertz near-field microscopy with subwavelength spatial resolution based on photoconductive antennas[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): E1 ~ E6.
- 36 Lee Y S. *Terahertz Science and technology*[M]. Berlin: Springer, 2009.
- 37 苗青,赵昆,田璐,等. 环氧树脂及其混合物的太赫兹光谱分析[J]. *现代科学仪器*, 2011(6): 31 ~ 33.
Miao Qing, Zhao Kun, Tian Lu, et al. Research on spectroscopy of epoxy resin and its mixture in terahertz range[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2011(6): 31 ~ 33. (in Chinese)
- 38 Macutkevic J, Seliuta D, Valusis G, et al. Terahertz time domain spectroscopy of epoxy resin composite with various carbon inclusions[J]. *Chemical Physics*, 2012, 404: 129 ~ 135.
- 39 Peters O, Busch S F, Fischer B M, et al. Determination of the carbon nanotube concentration and homogeneity in resin films by THz spectroscopy and imaging[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, 33(12): 1 221 ~ 1 226.
- 40 Brucherseifer M, Bolivar P H, Klingenberg H, et al. Angle-dependent THz tomography-characterization of thin ceramic oxide films for fuel cell applications[J]. *Applied Physics B*, 2001, 72(3): 361 ~ 366.
- 41 Pashkin A, Kužel P, Petzelt J, et al. Time-resolved and backward-wave oscillator submillimetre spectroscopy of some ferroelectric ceramics and thin films[J]. *Ferroelectrics*, 2002, 272(1): 219 ~ 224.
- 42 Reiten M T, Hess L, Chevillon R A. Nondestructive evaluation of ceramic materials using terahertz impulse ranging[C]// *Proceedings of SPIE, Vol 6179: Advanced Sensor Technologies for Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring*,

- 2006: 617905.
- 43 Owens L, Bischoff M, Cooney A, et al. Characterization of ceramic composite materials using terahertz reflection imaging technique [C] // 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011: 1 ~ 2.
- 44 Trofimov V A, Varentsova S A, Szustakowski M, et al. Efficiency of the detection and identification of ceramic explosive using the reflected THz signal [C] // Proceedings of SPIE, Vol 8363: Thrahertz Physics, Devices, and Systems VI: Advanced Applications in Industry and Defense 83630M - 16.
- 45 Shen Y C, Lo T, Taday P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(24): 241116 ~ 241116 - 3.
- 46 Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz [J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(1): 42 ~ 48.
- 47 Upadhyya P C, Shen Y C, Davies A G, et al. Terahertz time-domain spectroscopy of glucose and uric acid [J]. Journal of Biological Physics, 2003, 29(2): 117 ~ 121.
- 48 Ogawa Y, Cheng L, Hayashi S I, et al. Attenuated total reflection spectra of aqueous glycine in the terahertz region [J]. IEICE Electronics Express, 2009, 6(2): 117 ~ 121.
- 49 Van der Valk N C, Van der Marel W A, Planken P. Terahertz polarization imaging [J]. Optics Letters, 2005, 30(20): 2 802 ~ 2 804.
- 50 Wietzke S, Rutz F, Jördens C, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the plastics industry [C] // Terahertz Photonics Asia, International Society for Optics and Photonics, 2007, 68400V: 68400V - 1 ~ 68400V - 9.
- 51 Wietzke W, Jördens C, Krumbholz N, et al. Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints [J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2007, 2: 07013.
- 52 王鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测 [J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1 185 ~ 1 188.
Wang He, Zhao Guozhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1 185 ~ 1 188. (in Chinese)
- 53 Probst T, Scheller M, Koch M. Nondestructive thickness determination of plastic pipes in a nearby industrial environment using terahertz time domain spectroscopy [C] // 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011: 1 ~ 2.
- 54 Pastorelli G, Trafala T, Taday P F, et al. Characterisation of historic plastics using terahertz time-domain spectroscopy and pulsed imaging [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2012, 403(5): 1 405 ~ 1 414.
- 55 Deopura B L, Sengupta A K, Verma A. Effect of moisture on physical properties of nylon [J]. Polymer Communications, 1983, 24(9): 287 ~ 288.
- 56 Tajvidi M, Ebrahimi G. Water uptake and mechanical characteristics of natural filler-polypropylene composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88(4): 941 ~ 946.
- 57 Jördens C, Wietzke S, Scheller M, et al. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy [J]. Polymer Testing, 2010, 29(2): 209 ~ 215.
- 58 Kemp M C, Taday P F, Cole B E, et al. Security applications of terahertz technology [C] // Proceedings of SPIE, Vol 5070: Terahertz for Military and Securly Applications, 2003: 44 ~ 52.
- 59 Wang S, Ferguson B, Mannella C, et al. Powder detection using THz imaging [C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2002, 73: 132 ~ 133.
- 60 贾燕, 李宁, 逯美红, 等. 太赫兹光谱和成像技术在毒品识别和检测方面的应用 [J]. 现代科学仪器, 2006(2): 41 ~ 44.
Jia Yan, Li Ning, Lu Meihong, et al. Inspection and Identification of illicit drugs by using THz spectra and imaging [J]. Modern Scientific Instruments, 2006(2): 41 ~ 44. (in Chinese)
- 61 Dobroi A, Sasaki Y, Shibuya T, et al. THz-wave spectroscopy applied to the detection of illicit drugs in mail [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1 566 ~ 1 575.
- 62 Reid M, Fedosejevs R. Terahertz birefringence and attenuation properties of wood and paper [J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2 766 ~ 2 772.
- 63 Banerjee D, Von Spiegel W, Thomson M D, et al. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation [J]. Optical Express, 2008, 16(12): 9 060 ~ 9 066.
- 64 Siemion A, Siemion A, Makowski M, et al. Diffractive paper lens for terahertz optics [J]. Optics Letters, 2012, 37(20): 4 320 ~ 4 322.
- 65 Trafala T, Mizuno M, Fukunaga K, et al. Quantitative characterisation of historic paper using THz spectroscopy and multivariate data analysis [J]. Applied Physics A, 2013, 111(1): 1 ~ 8.
- 66 Mittleman D M, Hunsche S, Boivin L, et al. T-ray tomography [J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 904 ~ 906.
- 67 Aldrin J C, Roth D J, Seebo J P, et al. Protocol and assessment of signal processing and feature extraction methods for terahertz NDE for spray-on foam insulation [C] // AIP Conference Proceedings, 2007, 894: 432 ~ 439.
- 68 Zhao G, Mors ter M, Wenckebach T, et al. Terahertz dielectric properties of polystyrene foam [J]. Optical Society of America, 2002, 19(6): 1 476 ~ 1 479.

- 69 Quast H, Keil A, Löffler T. Investigation of foam and glass fiber structures used in aerospace applications by all-electronic 3D terahertz imaging[C]//2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011: 1~2.
- 70 Roth D J, Reyes-Rodriguez S, Zimdars D A, et al. Terahertz computed tomography of NASA thermal protection system materials [C]//AIP Conference Proceedings, 2012, 1430: 566~572.
- 71 Banks H T, Gibson N L, Winfree W P. 2D modeling of pulsed THz interrogation of SOFI with knit lines[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conference Proceedings, 2006, 894: 408~414.
- 72 Chiou C P, Thompson R B, Winfree W P, et al. Modeling and processing of terahertz imaging in space shuttle external tank foam inspection[C]//AIP Conference Proceedings, 2006, 820: 484~491.
- 73 Banks H T, Gibson N L. Void detection in foam with knit lines using THz pulse interrogation[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 44(9): 807~815.
- 74 Melapudi V R, Udpa L, Udpa S S, et al. Ray-tracing model for terahertz imaging of SOFI inspection[C]//AIP Conference Proceedings, 2006, 820: 477~483.
- 75 蔡禾,郭雪娇,和挺,等.太赫兹技术及其应用研究进展[J].中国光学与应用光学,2010,3(3):209~222.
Cai He, Guo Xuejiao, He Ting, et al. Terahertz wave and its new applications[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(3): 209~222. (in Chinese)
- 76 Rutz F, Koch M, Khare S, et al. Terahertz quality control of polymeric products[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(4): 547~556.
- 77 Jördens C, Scheller M, Wietzke S, et al. Terahertz spectroscopy to study the orientation of glass fibres in reinforced plastics[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(3): 472~477.
- 78 Polder D, Van Santen J H. The effective permeability of mixtures of solids[J]. Physica, 1946, 12(5): 257~271.
- 79 Nezasdal M, Schur J, Schmidt L P. Non-destructive testing of glass fibre reinforced plastics with a synthetic aperture radar in the lower THz region[C]//2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012: 1~2.
- 80 Karpowicz N, Dawes D, Perry M J, et al. Fire damage on carbon fiber materials characterized by THz waves[J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2007, 17(2): 213~224.
- 81 Zhang C, Mu K, Jiang X, et al. Identification of explosives and drugs and inspection of material defects with THz radiation[C]. Proceedings of SPIE Vol 6840: Treahertz Photonics, 2007: 68400S.
- 82 Redo-Sanchez A, Karpowicz N, Xu J, et al. Damage and defect inspection with terahertz waves[C]//The 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, 2006: 67~78.
- 83 Im K H, Hsu D K, Chiou C P, et al. Influence of terahertz waves on the fiber direction of CFRP composite laminates[C]//AIP Conference Proceedings, 2013, 1511: 604~611.
- 84 Im K H, Hsu D K, Chiou C P, et al. Terahertz radiation study on FRP composite solid laminates[C]//AIP Conference Proceedings, 2012, 1430: 1192~1199.
- 85 Park J W, Im K H, Hsu D K. Terahertz spectroscopy approach of the fiber orientation influence on CFRP composite solid laminates[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7): 2051~2054.
- 86 Dong H, Gong Y D, Thong P S, et al. Measurement of polarization dependent loss in terahertz time domain spectroscopy[C]. 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2009: 1~2.
- 87 Yang S-H, Kim K B, Oh H G, et al. Non-contact detection of impact damage in CFRP composites using millimeter-wave reflection and considering carbon fiber direction[J]. NDT & E International, 2013, 57: 45~51.
- 88 Saha S C, Grant J P, Khalid A, et al. Application of terahertz spectroscopy to the characterization of biological samples using birefringence silicon grating[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(6): 067006.
- 89 Hao G, Guo C, Du Y, et al. Investigation of diflubenzuron and cyhalothrin by terahertz spectroscopy and density function theory [C]//POEM 2011, Laser and Tera-Hertz Science and Technology, Wuhan, China, 2012.
- 90 廉飞宇,秦建平,牛波,等.一种利用太赫兹波谱检测地沟油的新方法[J].农业工程,2012,2(6):127~132.
Lian Feiyu, Qin Jianping, Niu bo, et al. The research on detecting waste oil utilizing terahertz spectroscopy[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(6): 127~132. (in Chinese)
- 91 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.
Qi Shuye, Zhang Zhenwei, Zhao Kun, et al. Evaluation of walnut by terahertz nondestructive technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3390~3393. (in Chinese)
- 92 Jiang F L, Ikeda I, Ogawa Y, et al. Rapid determination of saponification value and polymer content of vegetable and fish oils by terahertz spectroscopy[J]. Journal of Oleo Science, 2012, 61(10): 531~535.
- 93 Zhang X, Xu J. Introduction to THz Wave Photonics[M]. Berlin: Springer, 2010.
- 94 Mickan S P, Menikh A, Liu H, et al. Label-free bioaffinity detection using terahertz technology[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(21): 3789~3795.
- 95 Nagatsuma T. Terahertz technologies: present and future[J]. IEICE Electronics Express, 8(14): 1127~1142.