

文章编号: 2095-4980(2019)03-0379-06

基于太赫兹时域光谱技术的橡胶材料无损检测

陈奇, 李丽娟*, 任姣姣, 张丹丹

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对橡胶材料与金属板粘接样件厚度及粘接质量, 采用反射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统对其进行无损检测。通过对检测数据中各点时域波形飞行时间信息的分析, 得到样件橡胶部分的二维厚度分布图, 实现了橡胶样件厚度分布的可视化成像; 通过对检测数据中特征点波形及B-Scan图像的综合分析, 判断出样件的分层缺陷。该研究结果为橡胶材料厚度及分层缺陷的无损检测提供了有效的解决办法。

关键词: 橡胶材料; 太赫兹时域光谱系统; 无损检测; 厚度分布; 分层缺陷

中图分类号: TN215; O433.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0379

Nondestructive testing of rubber materials based on terahertz time-domain spectroscopy technology

CHEN Qi, LI Lijuan*, REN Jiaojiao, ZHANG Dandan

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Based on the thickness and bonding quality of rubber materials and metal plate bonding sample, nondestructive testing was performed by using reflective Terahertz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) system. Through the analysis of the flight time information of the time-domain waveform of each point in the testing data, the two-dimensional thickness distribution of the rubber part of the sample was plotted, which realized visualization of thickness distribution information. Through the comprehensive analysis of the characteristic point waveform and the B-scan image in the testing data, the delamination defects of the sample were determined. This study provides an effective solution for nondestructive testing of rubber materials thickness and delamination defects.

Keywords: rubber materials; Terahertz Time-Domain Spectroscopy system; nondestructive testing; thickness distribution; delamination defects

橡胶作为3大高分子材料之一, 具有比金属高的弹性, 且机械强度高, 耐屈挠性好, 因其特有的性质广泛用于多种领域^[1]。在航空航天领域中, 橡胶制品可作为固体火箭发动机中的密封件, 用来密封发动机内的高温高压燃气。由于制作工艺等原因, 橡胶材料不可避免地会出现橡胶-基体粘接不良、橡胶分层等缺陷, 需要一种有效的手段对橡胶材料进行无损检测以确保橡胶产品的质量。此外, 还需要对橡胶的厚度进行检测, 从而达到降低生产成本的目的。与传统无损检测如超声、红外热波、激光散斑等相比, 太赫兹(THz)无损检测凭借其安全、有效、非接触及抗干扰等特性, 无疑成为真正意义上的无损检测技术。

THz波通常指频率范围在0.1~10 THz的电磁波, 其波长范围在30 μm ~3 mm, 位于微波与红外波段之间, 具有毫米波和红外光波的特征, 在基础研究、航空航天、生物医学及农林等领域均有重要应用^[2]。由于THz波对于很多非极性材料和电介质材料具有很强的穿透力, 因此THz检测能够实现塑料、陶瓷、橡胶、木材、泡沫材料等不透明物体的检测, 形成一种基于射线的检测技术^[3-6]。

本文采用反射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统^[7]对橡胶材料与金属板粘接样件进行无损检测, 使用反卷积技术对THz时域信号进行处理, 减少了时域信号的脉宽, 提高了THz-TDS系统的检测分辨力。通过对样件反射

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2018-12-09

基金项目: 国防技术基础资助项目(JSZL2015411C002)

*通信作者: 李丽娟 email:custjuan@126.com

波形的分析，对样件可能出现的缺陷及样件厚度进行检测。

1 检测原理

1.1 反射式太赫兹时域光谱系统

采用反射式 THz-TDS 系统对橡胶材料与金属板粘接样件进行无损检测。该系统主要由飞秒激光器、THz 发射元件、THz 探测元件和时间延迟控制系统组成，工作原理如图 1 所示。飞秒激光脉冲作为泵浦和探测光源，经分束镜后分成 2 束，一大部分作为泵浦脉冲经过斩波器斩波后照射在 InAs 晶片表面，产生的 THz 辐射在样品处；另一部分作为探测光，经光电导取样测量获得时间分辨的 THz 光谱信息。该系统的频谱范围为 0.2~2.5 THz，频率分辨力为 3.1 GHz，信噪比大于 70 dB，快速扫描范围为 320 ps，时间分辨力为 0.1 ps，在扫描步距为 0.5 mm 时，扫描速度不高于 50 mm/s。若提高扫描速度，可采用增加采样频率或增加扫描步距的方法，当扫描步距为 1 mm 时，扫描速度可达 70 mm/s，但扫描速度最高不超过 100 mm/s。

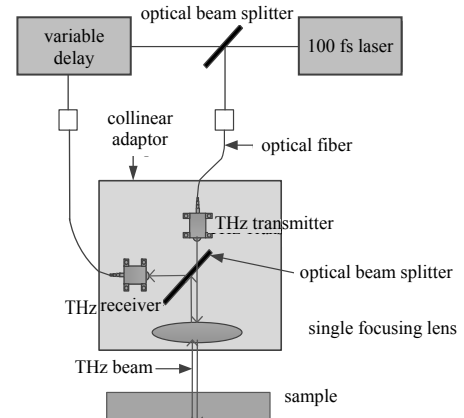


Fig.1 Schematic diagram of a reflective THz-TDS system
图 1 反射式太赫兹时域光谱系统原理图

1.2 THz 时域信号反卷积处理技术

典型的 THz 脉宽在皮秒量级，通过太赫兹取样技术，能够明显抑制周围环境噪声的干扰。该反射式 THz-TDS 系统发射的脉冲具有一定的宽度，当被测样件较薄时，由于脉冲宽度的原因，会发生波形混叠现象^[8]，不利于进一步分析和判断。随着脉宽的增加，被测样件的检测分辨力也会降低。基于以上问题，本文对 THz 时域信号做反卷积处理，将检测到的信号与由金属板反射得到的信号进行反卷积处理。

假设经过样品反射后，探测器接收到的信号为 $y(t)$ ，由金属板反射后探测器接收的信号为 $x(t)$ ，引入样品传递函数 $h(t)$ ，则有：

$$y(t) = h(t)x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \tag{1}$$

即经过样品反射的信号 $y(t)$ 为由金属板反射的信号 $x(t)$ 与传递函数 $h(t)$ 的卷积。

在频域上，式(1)可写为：

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \tag{2}$$

则样品的传递函数 $h(t)$ 可通过反卷积求得

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}\left(\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}\right) \tag{3}$$

在一些频率区域， $X(\omega)$ 幅值很小，可应用维纳滤波器作为反向滤波器避免发散，维纳滤波器定义为：

$$W(\omega) = \frac{\bar{X}}{|X(\omega)|^2 + 1/a} \tag{4}$$

式中 a 为被测信号与噪声功率的比值。应用维纳滤波器后，样品的传递函数表示为：

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}(Y(\omega)W(\omega)) \tag{5}$$

为获得脉冲宽度小的单峰值时域波形，对式(4)用高斯函数作为窗口函数，以获得干净的半周期脉冲。半波宽为 T_{FWHM} 的高斯脉冲函数表示为 $\exp\left(\frac{t^2}{-2(T_{FWHM}/2\sqrt{2\ln 2})^2}\right)$ ，则样品传递函数 $h(t)$ 可表示为：

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}\left(Y(\omega)W(\omega)\mathcal{F}\left(\exp\left(\frac{t^2}{-2(T_{FWHM}/2\sqrt{2\ln 2})^2}\right)\right)\right) \tag{6}$$

即经过样品反射接收到的信号 $y(t)$ 与经过金属板反射接收到的信号 $x(t)$ 的关系为：

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1}\left(Y(\omega)W(\omega)\mathcal{F}\left(\exp\left(\frac{t^2}{-2(T_{FWHM}/2\sqrt{2\ln 2})^2}\right)\right)\right)x(t) \tag{7}$$

图 2 为当 $T_{FWHM}=0.4\text{ ps}$ 时, 经反卷积处理前后获得的信号波形对比图。其中, 反卷积前的信号波形为本实验中使用的 THz-TDS 系统经过一定厚度空气后经金属板返回得到的。信号波形经处理后获得了一个形似高斯脉冲的无旁瓣单峰脉冲, 大大提高了系统的分辨力^[9]。在进行反卷积处理后, 在时域上提高了系统的时间分辨能力; 在频域上, 低频段信号信噪比有明显提升, 高频部分信噪比较差。

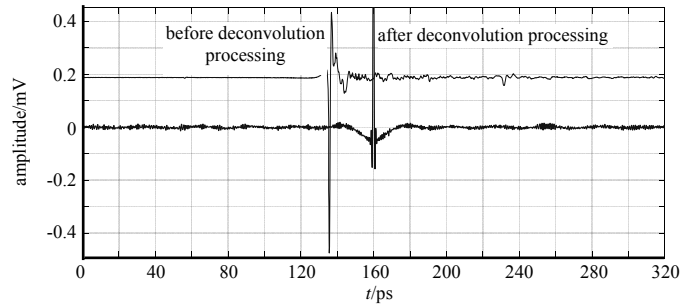


Fig.2 Comparison of signal waveforms before and after deconvolution processing
图 2 反卷积处理前后信号波形对比图

1.3 反射式 THz-TDS 无损检测原理

在进行信号波形的反卷积处理后, 得到经过整形的无旁瓣单峰脉冲, 卷积之后的波形主脉冲宽度变小, 可更好地计算波形的前峰值与后峰值的飞行时间差, 从而确定样件的厚度。并且, 经过卷积的信号波形, 由于主脉冲宽度变小, 由卷积前的 10 ps 变为卷积后的 1 ps, 可提高成像的分辨力, 对样件可检测更小的缺陷。通过观察特征点处波形在前峰值与后峰值之间是否出现第三峰值, 可判断样件是否存在分层缺陷。图 3 为基于反射式 THz-TDS 系统的无损检测原理示意图, 假设样件为均匀介质, 入射 THz 脉冲为 $E(t)$, 入射厚度为 d 的样件, 经样件上表面反射得到的脉冲为 $E_{up}(t)$, 穿过样件后, 经样件下表面金属基体反射, 由探测器接收到的脉冲为 $E_{down}(t)$, 若出现分层缺陷, 在 $E_{up}(t)$ 与 $E_{down}(t)$ 之间会出现第三峰值 $E(t)$ 。 $E_{up}(t)$ 与 $E_{down}(t)$ 的峰值对应的飞行时间分别为 T_{up} 与 T_{down} , 可根据式(8)求得样件的厚度:

$$d = \frac{c}{2n}(T_{down} - T_{up}) = \frac{c}{2n}\Delta T \quad (8)$$

式中: d 为太赫兹入射点处样件的厚度; n 为样品折射率; ΔT 为太赫兹波经上下表面反射回波信号的飞行时间差^[10]。

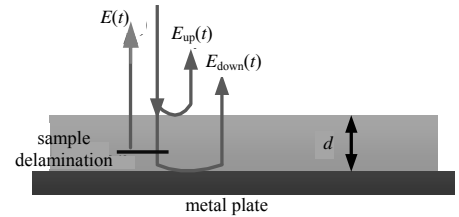


Fig.3 Schematic diagram of nondestructive testing
图 3 无损检测原理示意图

2 实验样件与检测过程

实验样件为橡胶材料和金属板粘接件, 如图 4 所示。其中, 橡胶上表面呈阶梯状, 具有不同的高度分布, 且表面有几处明显的小孔。样件平面尺寸为 265 mm × 164 mm, 最大厚度约为 17 mm。与橡胶粘接的金属板平面尺寸为 265 mm × 164 mm, 厚度约为 3 mm。采用反射式 THz-TDS 系统, 通过控制二维导轨的移动对样件进行检测。步进距离在 X 方向和 Y 方向均采用 0.5 mm。检测过程如图 5 所示。



Fig.4 Experimental sample
图 4 实验样件图

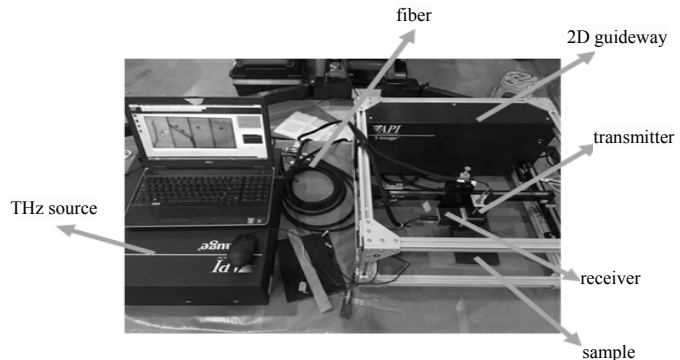


Fig.5 Testing process
图 5 检测过程

3 实验结果分析

3.1 样件厚度检测

图 6 为使用反射式 THz-TDS 系统得到的检测结果图。对橡胶材料厚度不同的区域进行编号, 分别为 1,2,3,4, 其中 1 号区域为样件最薄部分, 4 号区域为样件最厚部分。对 4 个区域的信号波形分别进行了提取, 得到如图 7

所示的信号波形信息。其中，波形 1 代表 1 号区域，波形 2 代表 2 号区域，波形 3 代表 3 号区域，波形 4 代表 4 号区域，可明显得出，随着不同区域厚度的增加，波形前峰值与后峰值对应的飞行时间差也逐渐增加。根据每个区域中特征点波形的峰值与后峰值之间的飞行时间差，可以计算出不同区域的样件的厚度。

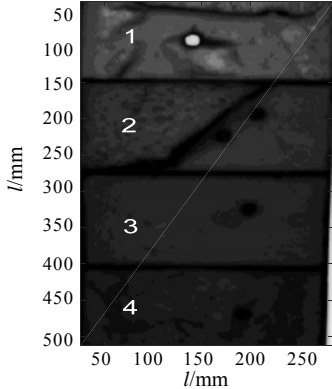


Fig.6 Sample testing results
图 6 样件的检测结果

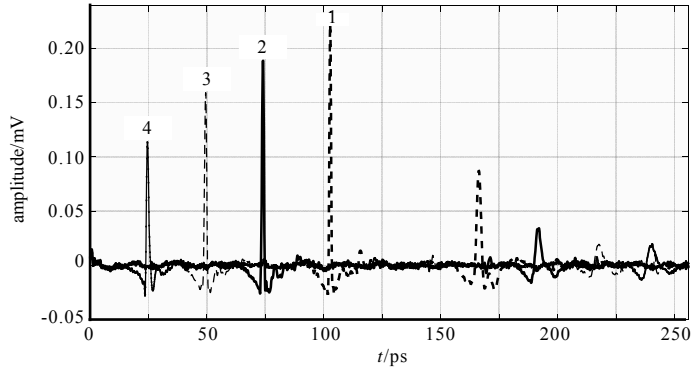


Fig.7 Waveform corresponding to different areas of the sample
图 7 样件不同区域对应的波形

根据式(8)样件厚度的计算方法，在 Matlab 中得到关于样件不同部分厚度分布的厚度云图，如图 8 所示。

已知该橡胶材料的折射率为 1.9，由图 7、图 8 可以十分直观地获得样品的厚度分布信息，即样件从 1 区域到 4 区域橡胶厚度依次递增，1 号区域大约厚度为 5 mm，2 号区域大约厚度为 9 mm，3 号区域大约厚度为 13 mm，4 号区域大约厚度为 17 mm，与实测厚度数据相符。

3.2 样件分层缺陷检测

从样件的正常区域选取一点，如图 9(a)所示，发现选取点处的信号波形峰值出现 2 次，分别是 THz 脉冲从橡胶样件的上表面及下表面反射的回波信号。若橡胶样件出现分层缺陷，在分层处会在前峰值与后峰值之间出现其他的信号峰值，体现在采集到的信号波形上，如图 9(b)所示。通过分析采集得到的样件的检测结果图，选取不同位置的信号波形，可找到橡胶样件中可能出现的分层缺陷^[11]。若橡胶为曲面，当出现分层缺陷时，在分层缺陷处会进行一次反射，波形在前峰值与后峰值之间仍会出现其他信号峰值，依然可以实现分层缺陷检测。

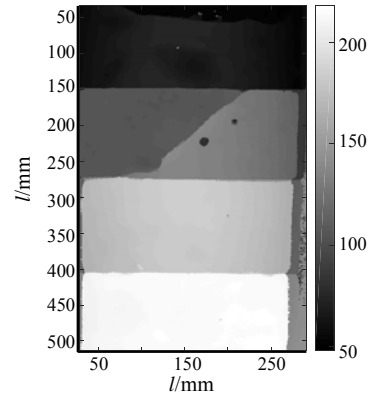
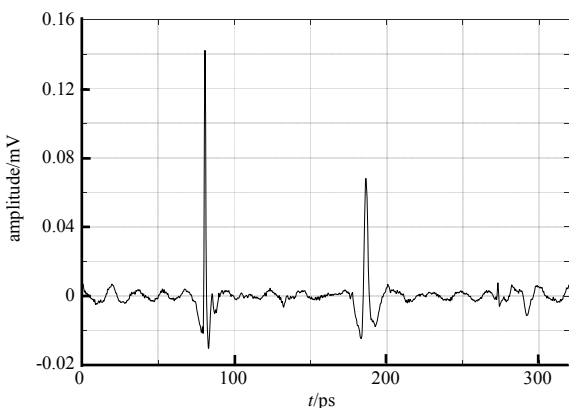
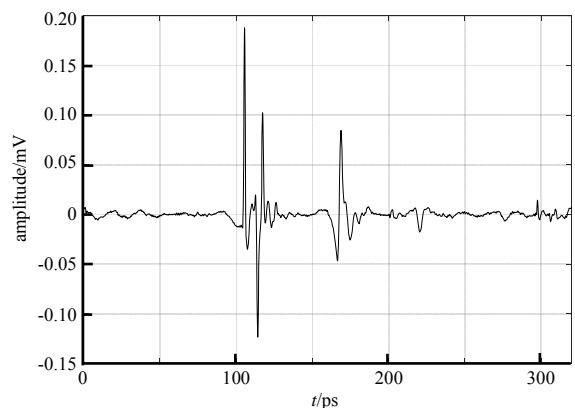


Fig.8 2D thickness distribution of the rubber part of the sample
图 8 样件橡胶部分的二维厚度分布图



(a) normal area feature point waveform



(b) layered defect feature point waveform

Fig.9 Comparison between normal waveform and defect partial waveform

图 9 正常波形与缺陷部分波形对比

经过对检测结果图像的波形分析，对出现异常波形部分的区域进行 B-scan 成像，发现确实出现分层缺陷，且通过 B-scan 图像可以更直观地体现出样件出现分层缺陷区域的大小及位置。在纵向深度上，根据图 9(b)第二峰值的位置信息，得出分层缺陷位置大约在 120 ps 处，距离上表面 0.9 mm 处，与 B-Scan 成像缺陷位置相互验

证。图 10 标记处为样件上出现分层缺陷的区域,图 11 为此区域的行、列 B-scan 成像图,为便于分辨,对 B-Scan 成像图进行了放大处理。图中白色圈出区域为出现分层缺陷区域。

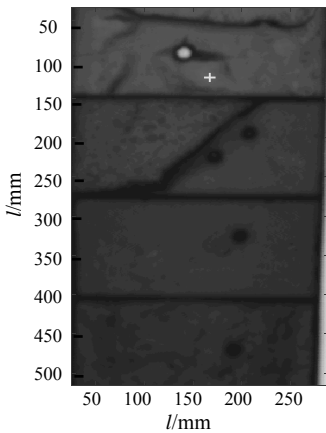


Fig.10 Layered defect area
图 10 出现分层缺陷区域

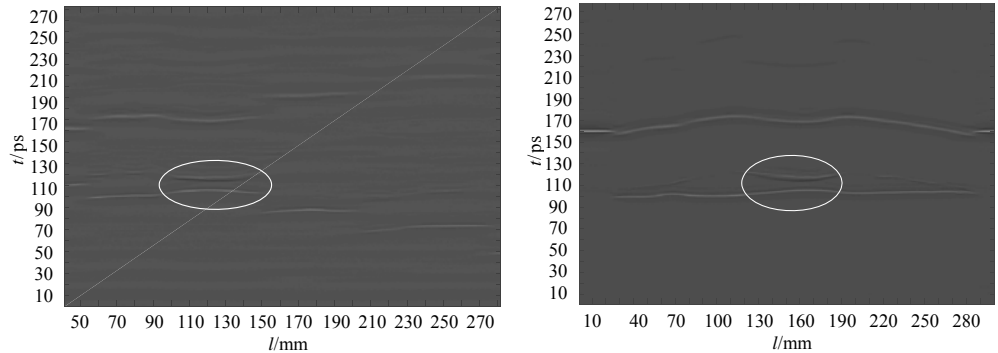


Fig.11 B-scan imaging of row and column
图 11 行、列 B-scan 成像图

4 结论

本文采用反射式太赫兹时域光谱系统,对阶梯厚度橡胶与金属板粘接样件的厚度和分层缺陷进行了检测。利用反卷积技术将系统的时域信号整形成无旁瓣的单峰脉冲,从而减小了太赫兹时域信号脉冲宽度,提高了系统的时间分辨能力;利用样件上、下表面回波信号的飞行时间差对样件不同区域的厚度进行检测,结合橡胶样件的二维厚度分布图,实现了样件不同区域厚度的可视化成像;根据样件区域的特征点波形在前峰值与后峰值之间出现第三峰值及 B-Scan 成像图,判断其存在分层缺陷的大小及位置。实验结果表明,反射式太赫兹时域光谱无损检测技术可以对橡胶材料进行厚度检测和分层缺陷分析,为橡胶材料的无损检测提供了新技术、新方法。

参考文献:

- [1] 左亮. 机车车辆中常用橡胶件的有限元分析[D]. 成都:西南交通大学, 2008. (ZUO Liang. Finite element analysis of commonly used rubber parts in rolling stock[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2008.)
- [2] 李高芳. 太赫兹(THz)波的外场调制以及相干控制研究[D]. 上海:上海大学, 2013. (LI Gaofang. Study on the external field modulation and coherent control of terahertz(THz) waves[D]. Shanghai,China:Shanghai University, 2013.)
- [3] 廖晓玲. 太赫兹光谱技术在复合材料无损检测中的应用研究[D]. 杭州:中国计量学院, 2015. (LIAO Xiaoling. Application of terahertz spectroscopy in nondestructive testing of composite materials[D]. Hangzhou,China:China Institute of Metrology, 2015.)
- [4] 张紫茵,邢砾云,张瑾,等. 太赫兹复合材料无损检测技术及其应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(4): 562-568. (ZHANG Ziyin,XING Liyun,Zhang Jin,et al. Terahertz composite nondestructive testing technology and application[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2015,13(4):562-568.)
- [5] 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):1185-1188. (WANG He,ZHAO Guozhong. Terahertz spectroscopy detection of several plastics[J]. Acta Photonica Sinica, 2010,39(7):1185-1188.)
- [6] PETERS O,SCHWERDTFEGER M,WIETZKE S,et al. Terahertz spectroscopy for rubber production testing[J]. Polymer Testing, 2013,32(5):932-936.
- [7] 梁玉庆. 反射式太赫兹波谱成像技术[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2011. (LIANG Yuqing. Reflective terahertz spectroscopy imaging technology[D]. Xi'an,China:Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2011.)
- [8] 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. (GUO Lantao,MU Kaijun, DENG Chao,et al. THz spectrum and imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(1):51-56.)
- [9] REN J,ZHAO D. The coating curing properties study using terahertz time domain spectroscopy[C]// Applied Optics and Photonics China. Beijing,China:[s.n.], 2015:967726-1-7.
- [10] 任姣姣,李丽娟,张丹丹,等. 太赫兹无损检测的多特征参数神经网络分析技术[J]. 光子学报, 2017,46(4):210-216. (REN Jiaojiao,LI Lijuan,ZHANG Dandan,et al. Multi-characteristic parameter neural network analysis technology for terahertz nondestructive testing[J]. Acta Photonica Sinica, 2017,46(4):210-216.)

- [11] 张瑾. 纤维增强复合材料的太赫兹无损检测研究[D]. 长春:吉林大学, 2016. (ZHANG Jin. Research on terahertz nondestructive testing of fiber reinforced composites[D]. Changchun, China: Jilin University, 2016.)

作者简介:



陈奇(1994-), 男, 长春市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测. email:438155412@qq.com.

李丽娟(1972-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹无损检测及三维测量.

任姣姣(1988-), 女, 博士, 主要研究方向为太赫兹无损检测.

张丹丹(1990-), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测.

第十三届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会征文通知

第十三届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会拟于2019年7月22日~26日在厦门举行。本届学会由中国核学会核电子学与核探测技术分会和四川省电子学会联合主办, 中国工程物理研究院电子工程研究所承办。

本届学会主要交流全国科研、院校和企业等单位在抗辐射加固技术方面的最新研究成果与动态, 以促进核、微电子、电磁脉冲等多学科的融合发展。会议将出论文集, 并评选优秀论文向核心期刊推荐发表。

诚挚欢迎抗辐射加固技术领域的专家学者和企事业单位相关人士积极撰稿并参加本届学术大会。现将会议有关事项通知如下:

一、征文范围

- 抗辐射电子学国内、外研究动态综述
- 核与空间辐射效应及加固技术
- 电磁脉冲效应与加固技术
- 抗辐射微电子技术
- 数值模拟与仿真
- 模拟实验技术与测试方法
- 评估技术与应用
- 其他相关技术

二、征文要求

- 1、论文应是未公开发表的研究成果或阶段性成果, 具有新颖性、创新性和参考价值。
- 2、论文应主题鲜明, 重点突出, 公式正确, 数据可靠, 文字流畅, 图表清晰; 字数不限。
- 3、论文集为不涉密的内部交流读物, 论文中不要涉及应用背景和保密的技术, 请作者和提交论文单位负责保密审查, 涉密单位请附保密审查意见(加盖公章)。
- 4、请将电子文稿用Email发送至: 赵洪超(zhaowaves@sohu.com); 通讯地址: 四川省绵阳市919信箱511分箱, 邮编621999, 赵洪超收。收文截止日2019年5月30日。

三、论文格式要求

1、论文应包括: 题目、作者、单位、通信地址、邮编、摘要(300字左右)、关键词、正文与参考文献。请附第一作者简介, 联系电话和Email地址, 便于联络。

2、论文使用Word 2007文档软件录入, A4幅面; 版心尺寸为245×165; 即上、下、左边界均为25 mm, 右边界为20 mm。题目为小二黑体, 作者为小四号仿宋体, 作者单位、通信地址为五号宋体, 摘要为小五号宋体, 正文为五号宋体, 标准字间距, 行距固定值24磅, 图、表中均为小五号宋体。

四、联系方式

赵洪超: 0816-2484513, 15008197236;
刘珉强: 0816-2484513, 18204313170

抗辐射电子学与电磁脉冲专业委员会
专委会挂靠单位: 中国工程物理研究院电子工程研究所
2019年3月25日