

文章编号: 2095-4980(2017)06-0909-07

Mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪的设计与应用

袁英豪^{1,2}, 周 正^{1,2}

(1.华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430223; 2.湖北久之洋红外系统股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘 要: 采用自主设计的光纤飞秒激光器、高速光学延时扫描机构、太赫兹发射和探测模块, 成功研制国内首台便携式实时太赫兹光谱仪工业产品(型号: mini-T)。光谱宽度覆盖 0.1~7 THz, 频谱分辨率 9 GHz, 波形采样速率达到 500 Hz, 动态范围优于 70 dB, 支持透射式、反射式和衰减全反射 3 种测量模式。采用高度集成的一体化设计方案, 整机尺寸仅 300 mm×200 mm×120 mm, 质量仅 7 kg, 支持内置锂电池工作(连续工作时间约 2.5 h)。本产品能够在 10~40℃ 环境温度范围内正常工作, 并且具有良好的振动稳定性, 可满足工业现场测量条件对太赫兹光谱仪实时性、便携式、环境适应性和可靠性的苛刻要求。

关键词: 太赫兹光谱; 飞秒激光; 光谱识别; 最小二乘法

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0909

Design and application of mini-T series portable real-time terahertz spectrometer

YUAN Yinghao^{1,2}, ZHOU Zheng^{1,2}

(1.Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan Hubei 430223, China;

2.Hubei Jiuzhiyang Infrared System CO., LTD., Wuhan Hubei 430223, China)

Abstract: Under the support of the national science and technology cooperation project(project number: 2014DFA11190), using self-designed optical fiber femtosecond laser, high-speed optical delay scanning device, terahertz emission and detection modules, the first portable real-time terahertz spectrometer industrial product(mode:mini-T) is successfully developed in China. Spectral width coverage of 0.1–7 THz, spectral resolution 9 GHz, waveform sampling rate reaches 500 Hz, dynamic range is better than 70 dB. It supports three measurement modes including the transmission, reflection and Attenuated Total Reflection(ATR). Using a highly-integrated design, the overall size is only 300 mm(long) ×200 mm(wide)×120 mm(high), and the weight is only 7 kg. It supports the built-in lithium batteries(continuous working hours about 2.5 h). This product can work normally in 10–40 °C range, and has a good vibration stability, which can meet the challenging requirements for industrial field measurement conditions, such as real-time, portable, environmental adaptability and reliability.

Keywords: terahertz spectroscopy; femtosecond laser; spectral recognition; least squares method

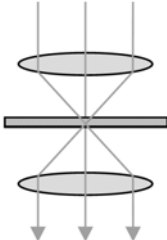
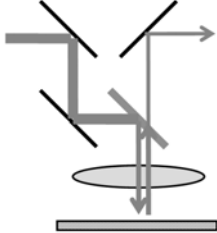
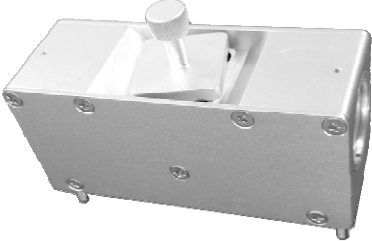
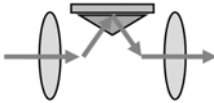
为了应对日趋严重的毒品走私等公共安全问题, 急需一种有效的无损检测技术, 对匿藏的毒品等违禁品进行快速准确的鉴定; 同时, 为了应对屡见不鲜的假冒伪劣药品及食品卫生等民生健康问题, 也急需一种有效的药品食品质量监控技术。太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种有效的光谱测试技术, 能够对生物大分子和化学大分子的物质结构和成分进行无损、非接触式鉴定^[1]。基于这一特点, THz-TDS 技术在爆炸物、毒品、病毒等违禁品安检领域和药品食品质量检测领域有着独特的应用价值^[2]。国外已经有大量 THz-TDS 产品问世并得到广泛应用: 美国和日本的邮政机构将 THz-TDS 技术用于邮件内部违禁品检查; 英国 TeraView 公司将 THz-TDS 技术用于药品生产线在线质量控制。国内近些年来太赫兹光谱技术发展迅速, 已有多家单位报道推出了太赫兹光谱仪产品。但是这些已报道的产品多数只能应用于实验室环境, 尚无法满足工业现场测量条件对太赫兹光谱仪产品实时性、便携性、环境适应性和可靠性等方面的苛刻要求。

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2017-01-05

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目(2014DFA11190)

- 7) 主控电路板：主要用于控制慢速和高速光学延时扫描机构的扫描运动，给太赫兹发射模块提供工作所需要的偏置电压，对太赫兹探测模块输出的微弱电信号进行放大和 A/D 转换，然后封装为 USB 协议的数据帧发送给嵌入式系统板进行后续处理。
- 8) 嵌入式系统板：系统内运行光谱分析软件，对主控电路板发送来的原始采样数据进行处理，输出太赫兹时域波形和频谱波形，并提供光谱识别、材料参数(介电常数和吸收系数)测量、厚度测量等太赫兹光谱应用功能。
- 9) 触摸显示屏：输出显示光谱分析软件的各种测量结果，并以触摸形式实现用户人机交互功能。
- 10) 测量组件：采用可插拔替换式测量组件设计方案，可实现透射式、反射式和衰减全反射(ATR)测量^[5]3 种测量模式。其中，透射式适用于低吸收样品(粉末或压片)的光谱分析；反射式适用于分析样品的分层结构；而 ATR 适用于对高吸收样品(液体、粉末)进行光谱分析。
- 表 1 所示为 3 种测量组件的实物照片和光路原理图。

表 1 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪 3 种测量组件设计
Table1 Design of three measurement modules for the portable real-time terahertz spectrometer industrial product(mode: mini-T).

measurement component	physical photo	schematic of terahertz beam path	application scenario
transmission			spectral analysis for low absorption powder and tablet samples
reflection			analyze sample's layered structure
ART			spectral analysis for high absorption powder and liquid samples

2 性能测试

2.1 太赫兹时域波形和频谱性能

图 3 所示为本文研制的 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪时域波形和频谱测试结果。测试时，环境温度分别为 26℃ 和 46%；测量方式采用透射式；待测样品为室内空气。图中噪声表示当太赫兹光路被完全遮挡时的信号情况。受水汽影响作用，时域波形的主峰后有明显的波动，主峰后约 50 ps 的位置可看到一个次峰，这是由于设备内部光路设计中的镜面反射所导致的。频域波形中的众多凹陷波动表明频谱测试结果受水汽吸收作用影响明显。

2.2 性能稳定性测试

对于工业产品而言，设备长时间工作的性能稳定性至关重要。为了评估 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪的性能稳定性，本文测试记录了设备连续工作时太赫兹时域波形 4 个关键参数随时间的变化曲线，见图 4，分别是：a) 时域波形幅度：该参数反映设备整体性能的稳定性；b) 时域波形的半高宽(Full Wave at Half Maximum，

FWHM): 该参数体现内部飞秒激光脉冲宽度的稳定性, 间接反映频谱宽度的稳定性; c) 和 d) 时域波形的极大值和极小值位置: 这 2 个参数反映内部光学延时机构的稳定性, 对于基于飞行时间原理的光谱测量应用至关重要。测试时间总长 4 h 以上, 每隔 1 min 记录 1 次数据, 波形测量速率为 3 s/次。测试过程中, 环境温度和湿度分别在 25.5~27 °C 和 34.1%~38.6% 之间变化。测试结果表明: 上述 4 个参数的测量重复率分别达到 $\pm 0.47\%$ 、 $\pm 0.67\%$ 、 $\pm 0.34\%$ 和 $\pm 0.33\%$ 。

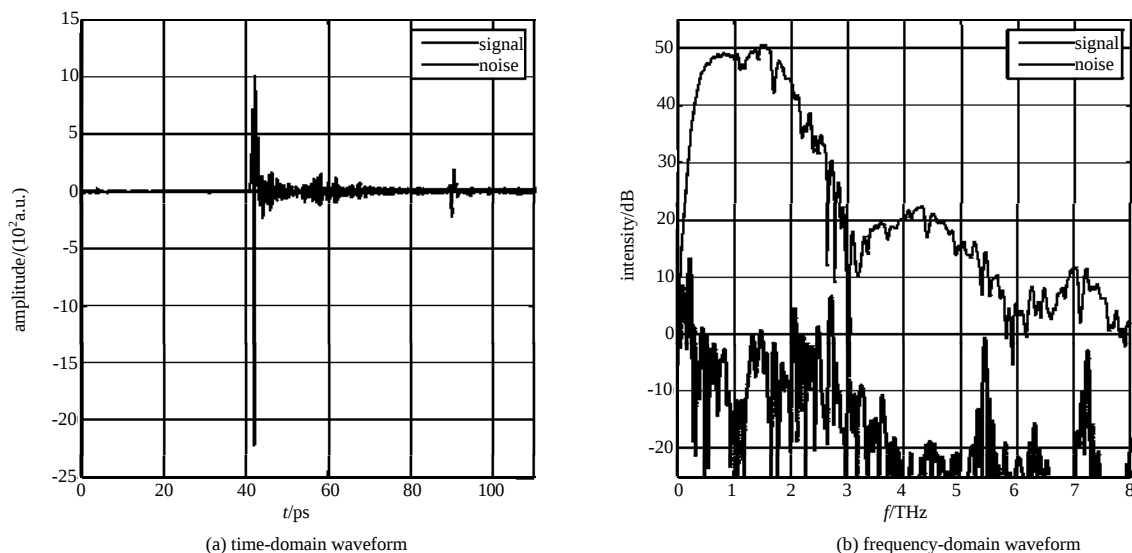


Fig.3 Time-domain and frequency-domain waveforms test results of the portable real-time terahertz spectrometer industrial product(mode: mini-T)

图 3 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪时域波形和频谱测试结果

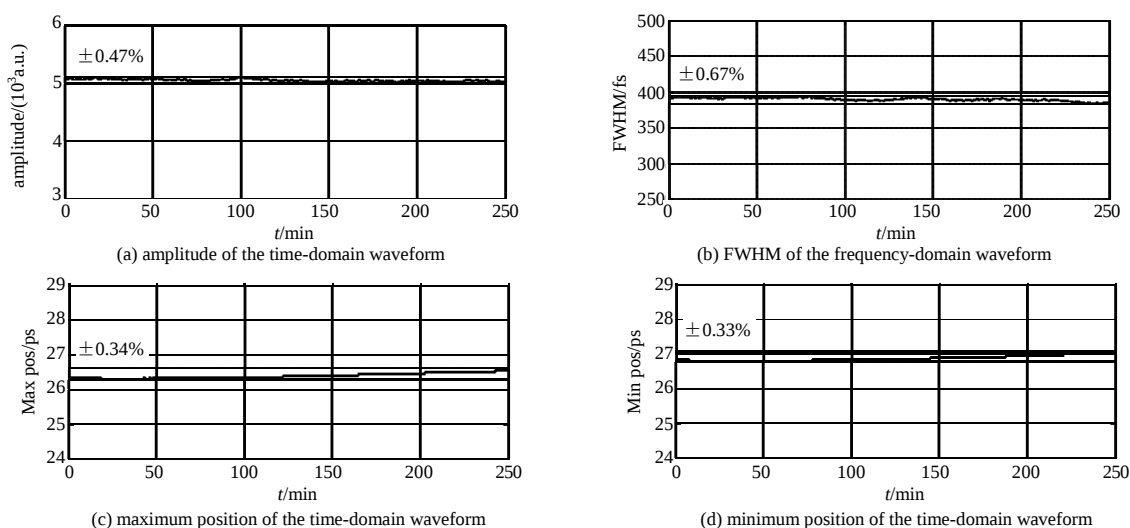


Fig.4 Repeatability test of the time-domain waveform

图 4 时域波形的重复性测试

3 应用测试

对于太赫兹光谱仪产品而言, 设备硬件和光谱分析软件的使用难易程度直接影响产品在非专业技术人群中的推广效果。本文所研制的 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪面向非技术人员使用, 设备硬件支持一键开机工作, 光谱分析软件支持自动给出测试结果并生成测试报告, 见图 5。目前的光谱分析软件中已支持对物质成分自动进行光谱识别、支持材料复介电常数测量功能。

3.1 物质成分光谱识别

由于很多大分子物质在太赫兹波段具有独一无二的特征光谱, 因此太赫兹光谱仪能够对未知物质的成分进行光谱识别。本软件采用基于最小二乘和带权重因子的相关算法^[5-6], 能够自动根据光谱特征匹配识别出物质名称。为了测试软件的光谱识别效果, 本文对图 6 中的 4 种样品进行了测试。4 种样品分别为: 对氨基苯甲酸、L-酪氨酸

酸、L-半胱氨酸和胱氨酸,均为粉末状装于塑料密封袋内,测量时未进行压片处理,直接将密封袋插入太赫兹光路中进行测试。

图7为上述4种样品的测试结果,软件自动准确地识别出了4种样品的物质成分,其中,对氨基苯甲酸、L-酪氨酸、L-半胱氨酸和胱氨酸的软件算法匹配系数分别为91%,58%,49%,72%,平均光谱识别速度达到2 s/次。

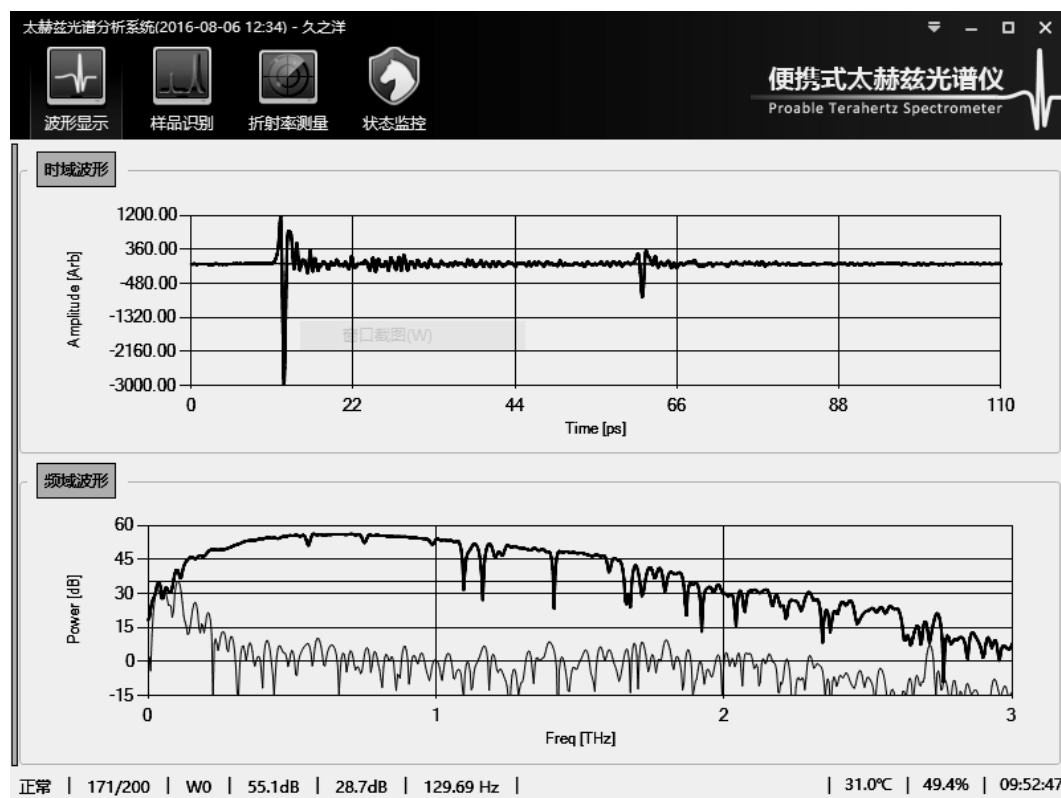


Fig.5 Waveform display interface of spectrum analysis software

图5 光谱分析软件的波形显示界面



Fig.6 Photos of the four tested samples

图6 4种待测样品实物照片

3.2 材料物理参数测量

太赫兹时域光谱系统不仅能够测量太赫兹波经过材料后的幅度衰减情况,而且能测量太赫兹波经过材料的光学延时量,因此能够用来测量提取材料在太赫兹波段的复介电常数^[7-8]。本软件支持自动计算材料的上述物理参数,实际操作使用时,仅需要输入材料的厚度即可,测量时间仅需数秒。图8展示了采用所开发的软件自动测试计算材料在太赫兹波段的复介电常数效果。测试样品为厚度1 mm的聚乙烯平板材料,测试结果表明在0.1~1 THz范围内的折射率约为1.5,与其他文献报道的测试结果比较吻合。为了获得更准确的测试结果,需要精确控制平板样品的上下表面的平行度和粗糙度,并准确测量样品的厚度。

4 结论

本文全面介绍华中光电技术研究所研制的 mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪产品的整机方案、产品性能和实际应用效果。本产品的光谱宽度覆盖 0.1~7 THz, 频谱分辨力为 9 GHz, 波形采样速率达到 500 Hz, 动态范围优于 70 dB, 支持透射式、反射式和 ATR 3 种测量模式。采用高度集成的一体化设计方案, 整机尺寸仅 300 mm×200 mm×120 mm, 质量仅 7 kg, 支持内置锂电池工作(连续工作时间约 2.5 h)。本产品能够在 10~40℃ 环境温度范围内正常工作, 并且具有良好的振动稳定性。本产品可满足工业现场测量条件对太赫兹光谱仪实时性、便携式、环境适应性和可靠性的苛刻要求。

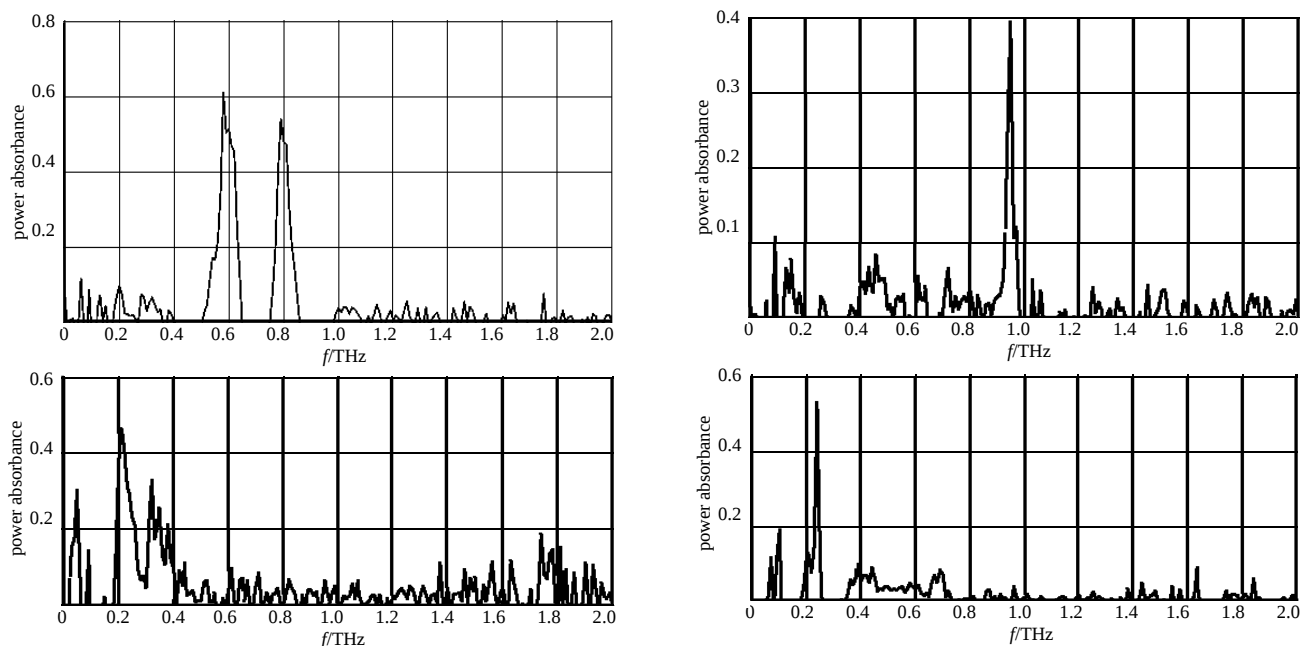


Fig.7 Performance of automatic spectrum recognition on four powdery samples
图 7 4 种粉末状样品的自动光谱识别效果



Fig.8 Spectral analysis software test: calculating the complex permittivity of materials in the terahertz band
图 8 光谱分析软件测试计算材料在太赫兹波段的复介电常数

参考文献:

- [1] AUSTON D H,CHEUNG K P,VALDMANIS J A,et al. Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-Optic media[J]. Physical Review Letters, 1984,53(16):1555-1558.
- [2] 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. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz science and technology and application[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [3] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京:科学出版社, 2011. (ZHANG Zhigang. Femtosecond laser technology[M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [4] TAKAZATO A,KAMAKURA M,MATSUI T,et al. Terahertz wave emission and detection using photoconductive antennas made on low-temperature-grown InGaAs with 1.56 μm pulse excitation[J]. Applied Physics Letters, 2007,91(1):011102/1-011102/3.
- [5] SCHULKIN B,BRIGADA D,JAMES J S,et al. Progress toward handheld THz sensing[C]// 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Houston,USA:[s.n.], 2011:1-2.
- [6] 陈韬,孟坤,朱礼国,等. 基于太赫兹光谱成像技术的智能处理方法分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1): 7-12. (CHEN Tao,MENG Kun,ZHU Liguang,et al. Intelligent processing methods based on the terahertz spectral imaging technique[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):7-12.)
- [7] TIMOTHY D Dorney,RICHARD G Batniuk,DANIEL M Mittleman. 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.
- [8] LEE Yunshik. Principles of terahertz science and technology[M]. New York:Springer, 2009.

作者简介:



袁英豪(1984-),男,河南省禹州市人,博士,高级工程师,从事太赫兹光谱与成像技术研究和相关产品的工程化和产业化工作,现任717所首届青年学科带头人,久之洋公司太赫兹事业部主任,现承担国家科技部国际科技合作项目1项,发表SCI学术论文4篇,已授权国家发明专利3项、实用新型专利1项以及计算机软件著作权1项.email:yinghao.yuan@foxmail.com.

周正(1989-),男,湖北省黄冈市人,硕士,工程师,主要研究方向为信号处理技术.