

文章编号: 2095-4980(2018)06-0943-07

1 550 nm 激光激发的紧凑型太赫兹时域光谱仪

潘奕^{1,2}, 郑渚^{*1,3}, 李程¹, 何坚兵¹, 邓仕发¹, 丁庆¹, 姚勇²(1.深圳市太赫兹科技创新研究院, 广东 深圳 518102; 2.哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055;
3.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为开发紧凑、轻质量、高稳定度的光纤耦合太赫兹时域光谱仪(THz-TDS), 从色散补偿、非线性效应、偏振效应、天线参数等方面对基于 1 550 nm 波长的光纤飞秒激光器激发的太赫兹时域光谱系统进行理论及实验研究。结果显示, 光纤耦合的光谱仪光谱带宽可达 4.5 THz, 动态范围达 70 dB, 质量 12.3 kg, 光路模块体积 250 mm × 90 mm × 50 mm。进一步测试机械振动及环境温度对仪器的影响, 在一定范围内, 仪器具有较高的鲁棒性, 可适应工业产业应用需求。

关键词: 太赫兹; 太赫兹时域光谱; 光纤飞秒激光

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0943

Compact terahertz time-domain spectrometer excited by 1 550 nm laser

PAN Yi^{1,2}, ZHENG Zhu^{*1,3}, LI Cheng¹, HE Jianbing¹, DENG Shifa¹, DING Qing¹, YAO Yong²

(1.Shenzhen Institute of THz Technology and Innovation, Shenzhen Guangdong 518102, China;

2.Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China;

3.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In order to achieve a compact, lightweight, stable fiber-coupled Terahertz Time-Domain Spectrometers(THz-TDS), Theoretical and experimental studies on THz-TDS excited by a 1 550 nm fiber femtosecond lasers are carried out in terms of dispersion compensation, nonlinear effects, polarization effects and antenna parameters. As a result, a flexible THz spectroscopy system with a spectral bandwidth over 4.5 THz and a dynamic range of 70 dB is realized. In addition, the system is 12.3 kg in weight and the optical module is 250 mm × 90 mm × 50 mm in size. The system is tested in terms of stability at different conditions of mechanical vibrations and environmental temperatures. The results show that the system is highly robust and could be applied for industrial applications.

Keywords: terahertz; Terahertz Time-Domain Spectroscopy; fiber femtosecond laser

基于超快飞秒激光的太赫兹时域光谱仪(THz-TDS)是太赫兹科学和技术研究中的重要实验仪器, 在材料研究、无损检测、光谱测量、半导体缺陷检测等科研及产业领域具有广泛应用^[1-4]。目前THz-TDS的应用多停留于实验室中, 部分原因在于许多实验室使用的THz-TDS是由800 nm波段的固体钛蓝宝石飞秒激光器激发, 其光路由自由空间光学组件构成, 体积大, 稳定性相对差, 使用环境要求较严格, 难以满足太赫兹工业及产业应用需求。而波长在1 550 nm附近的光纤飞秒激光器, 具有高稳定性和易实现全光纤系统的特点, 通过与光纤耦合光电导天线模块相结合, 可实现结构紧凑、使用灵活的光纤THz-TDS系统, 在产业应用领域具有较大优势, 近年来受到越来越多的关注^[5-7]。

800 nm的固体飞秒激光激发的THz-TDS系统与1 550 nm的光纤飞秒激光器激发的THz-TDS系统存在很多显著区别: 首先, 在800 nm波段的钛蓝宝石飞秒激光器构成的THz-TDS系统中, 多采用低温生长砷化镓(LT-GaAs)材料衬底的光电导天线, 以获得很低的暗电流噪声, 提高系统动态范围; 但在1 550 nm波段, 由于LT-GaAs的光学带隙较宽, 无法获得激光有效激发^[8]。所以在这类THz-TDS系统中, 多采用低温生长的InGaAs、掺铁InGaAs

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61505183; 61575051); 中国博士后科学基金资助项目(2017M611363); 深圳市计划资助项目(JSGG20150529153336124; JCYJ20150529114045265)

*通信作者: 郑渚 email: zzealot99@gmail.com

等作为光电导天线衬底材料,同时采用多层异质结构(Multi-Layer Hetero-Structure, MLHS),以有效提高太赫兹产生和探测效率^[9-11]。

与自由空间光路的THz-TDS系统不同,光纤型THz-TDS系统通过光纤传输飞秒激光脉冲,必须考虑光纤带来的损耗、色散、非线性等对飞秒激光脉冲的影响。在1 550 nm波段,单模光纤损耗小于1 dB/km,对于短距离传输损耗可忽略不计。对在光纤中传播的飞秒激光脉冲而言,在光纤中不同波长的谱分量以不同的速度传播是一个不能忽视的效应,即群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD),会造成飞秒脉冲的显著展宽。飞秒脉冲宽度的增大会降低飞秒脉冲的峰值功率,影响激发太赫兹波的功率和带宽。为消除飞秒脉冲展宽对THz-TDS系统带来的不良影响,必须对飞秒激光脉冲进行色散补偿。在光纤THz-TDS系统中,经常使用包括利用色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)、棱镜对、衍射光栅对和啁啾反射镜等光学元器件进行色散补偿^[12-13]。其中,使用DCF进行色散补偿,因为不使用自由空间光路元件,故系统具有非常高的稳定度,适合工业及产业应用。DCF具有正常色散,通过精确裁剪其长度,可以补偿单模光纤带来的反常色散,使平均色散接近零。同时,光纤带来的非线性效应会改变飞秒脉冲的光谱分布,从而造成飞秒脉冲的时域展宽,这类效应一般较难补偿^[14],选择合适的激发激光功率可有效降低非线性效应影响。

另一方面,单模保偏光纤支持2种本征偏振模的传播,2种偏振模传播速度存在差别,即存在偏振模式双折射现象,这种效应也会造成脉冲展宽甚至脉冲分离^[15]。同时,多层异质结构光电导天线对偏振态有选择性,其发射功率与激光偏振相关。所以,针对进入天线的激光偏振态需要进行实验研究,以获得最佳激发效果。

本文介绍了紧凑型1 550 nm光纤耦合THz-TDS的系统设计,对飞秒脉冲在光纤传播的色散、非线性效应进行理论及实验研究,采用光纤色散补偿方案保证通过保偏光纤后用于激发电导天线的激光脉冲质量。为满足紧凑型系统设计的要求,设计了一款小型光路模块包含快速延迟扫描、偏振控制以及光纤耦合功能,对光纤型THz-TDS系统性能及稳定性进行了实验测试。

1 光电导天线参数及实验设置

1.1 光电导天线参数

实验中使用的太赫兹发射及接收器均是基于InAlAs/InGaAs材料的多层异质结构(MLHS)光电导天线^[9]。发射天线为间隙100 μm 的共平面波导天线;接收天线为臂长25 μm 的偶极子天线,两臂间距10 μm 。发射天线和接收天线异质结构层均具有台面结构,以提高发射及接收效率。发射和接收天线的衬底都安装了直径10 mm、厚度6 mm的超半球硅透镜,分别用于太赫兹波的准直和聚焦。发射和接收天线均封装在直径25 mm的紧凑外壳内,与长度为1 m的单模保偏光纤直接连接,激光通过光纤耦合。

1.2 实验装置

实验中使用的THz-TDS系统的激发源为一台掺铒光纤飞秒激光器,其中心频率为1 550 nm,重复频率为100 MHz,脉冲半高宽度(Full Width Half Maximum, FWHM)约为50 fs。实验装置如图1所示,飞秒激光器的输出端口通过法兰盘连接色散补偿光纤,最大输出功率为150 mW。色散补偿光纤尾端连接光纤准直透镜,光束通过一个偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)分成2束,一束耦合至太赫兹发射天线尾纤,另一束经过可变光程的延迟线耦合至太赫兹接收天线尾纤,天线尾纤耦合器前均加入半波片以调节激光的偏振方向。一对焦距为50 mm的离轴抛物面镜分别置于发射和接收天线后用于聚焦和准直太赫兹波,两抛物面镜间距约为100 mm。激光延迟线采用音圈电机带动后向反射镜进行快速扫描的方式,扫描范围为8 mm,相应的激光时延约为54 ps,扫描频率为3 Hz。延迟位置由光栅尺反馈,精确度可达4 μm 。发射天线端施加0~80 V可调方波电源,设置占空比为50%,利用锁相放大器(SR860)进行信号提取,调制频率为13.7 kHz,选用大于10 kHz的调制频率可有效降低检测信号受低频电子串扰信号的影响。接收天线的小电流信号经过跨阻放大器转换为电压信号。整个THz-TDS系统置于普通空气环境中测量。

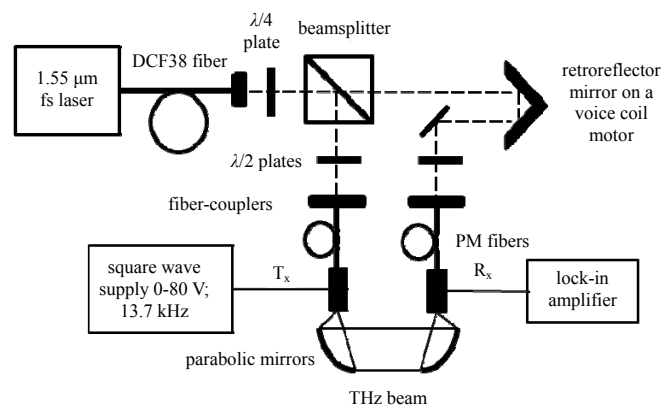


Fig.1 Experimental setup
图1 实验装置

2 实验结果与讨论

2.1 色散补偿及非线性效应

飞秒激光脉冲在与太赫兹光电导天线连接的单模保偏光纤中传输时,不同频率的谱分量传播速度不同,带来群速度色散(GVD)效应,造成飞秒脉冲时间变宽,为克服这种效应的影响,需对光纤色散进行补偿。超快脉冲在光纤传输过程中经历的二阶GVD大小 β_2 可由式(1)描述^[11]:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}D \quad (1)$$

式中: λ 为激光脉冲的中心波长; c 为真空中的光速; D 为光纤色散参量。实验中使用的单模保偏光纤(PM1550, Thorlabs)的色散参量为+18 ps/km/nm。由式(1)可以得出,对于实验中1 m长的与发射及接收天线连接的单模保偏光纤,其 β_2 约为-0.23 ps²。

为补偿保偏光纤带来的反常色散,实验系统中加入色散补偿光纤(DCF38, Thorlabs),其色散参量在1 550 nm波段为-38 ps/km/nm。为控制总色散值约为零,色散补偿光纤长度约为0.47 m。考虑其他光学器件的色散影响,实际实验中使用0.45 m长的DCF38可以获得最佳补偿效果。为确定色散补偿效果,使用自相关仪分别测量了激光原始输出、仅经过1 m的PM1550后以及经过1 m的PM1550和0.45 m的DCF38后的激光脉冲宽度,结果如图2所示。从图中可见,经过色散补偿的飞秒脉冲宽度约为53 fs,与激光原始输出脉宽50 fs相近。而仅通过1 m的PM1550光纤,未经色散补偿的飞秒脉冲展宽非常明显,展宽约为0.2 ps,图中没有给出其测量结果。实验结果证明,通过使用长度恰当的DCF,单模保偏光纤中的GVD可得到很好的补偿,确保了进入太赫兹光电导天线的飞秒脉冲质量。

从图2可以看出,即使经过GVD补偿,飞秒脉冲的宽度仍然略大于原始激光输出,这与光纤中的高阶色散及非线性效应有关。自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)作为一种典型的非线性效应,是影响飞秒脉冲宽度的主要因素^[14]。与GVD不同,SPM是一种与脉冲光场强度分布相关的相移,这种调制作用会造成光谱能量的重新分布,从而展宽飞秒脉冲。随激光功率增加,SPM效应导致的脉冲展宽也会增大,而SPM造成的脉冲展宽不能通过简单的方法得到压缩,需要选择合适的激光激发功率以抑制这种效应。实验中,测量了经过单模光纤和色散补偿光纤后的激光脉冲宽度随输入激光功率的变化,结果如图3所示。从实验数据中可以看出,随激光功率增加,飞秒脉冲宽度变化明显:功率小于20 mW时,脉冲宽度小于60 fs,与原始激光输出脉宽相当,而当功率升高至150 mW时,脉冲宽度则达到140 fs。为保证激发电导天线的飞秒脉冲质量,发射和接收端的激光功率都应控制在20 mW以内。

2.2 激光偏振态

单模保偏光纤支持2种本征线性偏振模的传输,其偏振方向分别沿光纤的快轴和慢轴,2种偏振模光纤折射率不同,快轴折射率设为 n_1 ,慢轴折射率设为 n_2 。如果激光输入偏振方向对准快轴或慢轴,脉冲将得到保持;如果输入偏振没有对准光轴,2个本征偏振分量将分别沿快轴和慢轴以不同的速度传播,将造成脉冲的展宽甚至分离为2个脉冲,影响太赫兹时域脉冲测量结果。同时,不同偏振的激光对基于InAlAs/InGaAs的多层异质结构的光电导天线的激发效率不同。为取得最佳激发效果,天线尾纤在安装时需与最佳激发偏振方向对准,同时需要调整输入尾纤的激光偏振。

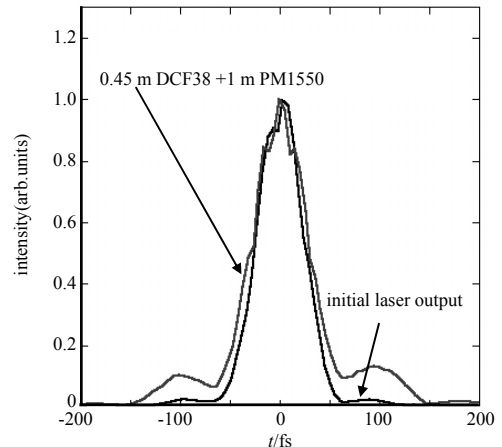


Fig.2 Temporal laser pulse widths of the initial output and of the laser pulse with the dispersion compensation

图2 激光原始输出及经过色散补偿后的脉冲时间宽度

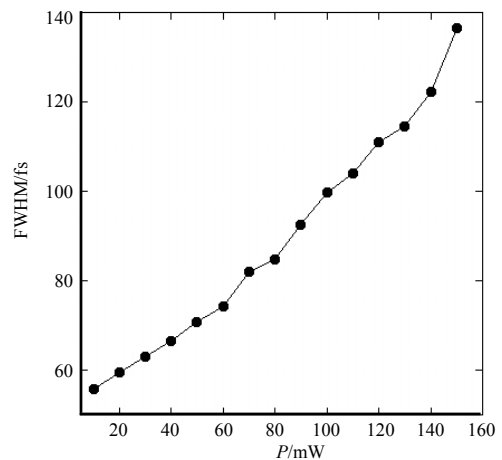


Fig.3 Temporal pulse widths of the laser pulse as a function of the output power

图3 激光脉冲时间宽度与激光输出功率的关系

实验中,利用半波片可以控制进入太赫兹发射天线的激光偏振,如图4(a)所示,随半波片角度变化,检测到的太赫兹信号峰峰值幅度发生明显改变,在偏振方向对准光纤快轴时,天线获得最佳激发效果,而当偏振方向转至慢轴方向,太赫兹信号幅度只有最佳激发的70%左右。图4(b)显示了激光偏振沿光纤快轴(0°)、光纤慢轴(90°)以及 45° 方向入射得到的太赫兹时域信号。实验结果显示,沿快轴激发的太赫兹信号与沿慢轴激发的太赫兹信号存在约1.3 ps的时延,实验中使用1 m长的保偏光纤,其快轴折射率 $n_1=1.4610$,慢轴折射率 $n_2=1.4614$, $\Delta n=0.0004$,则可得沿快慢轴传播的激光时差为1.27 ps,与实验结果一致。当激光沿 45° 方向传播时,太赫兹时域信号存在2个峰值,位置分别与快轴信号峰值和慢轴信号峰值吻合,说明信号发生了脉冲分离现象,这将对太赫兹时域信号的幅度和带宽造成不良影响。所以,在光纤型时域光谱仪器中,有必要使用半波片控制进入保偏光纤的激光偏振,以获得最优结果。

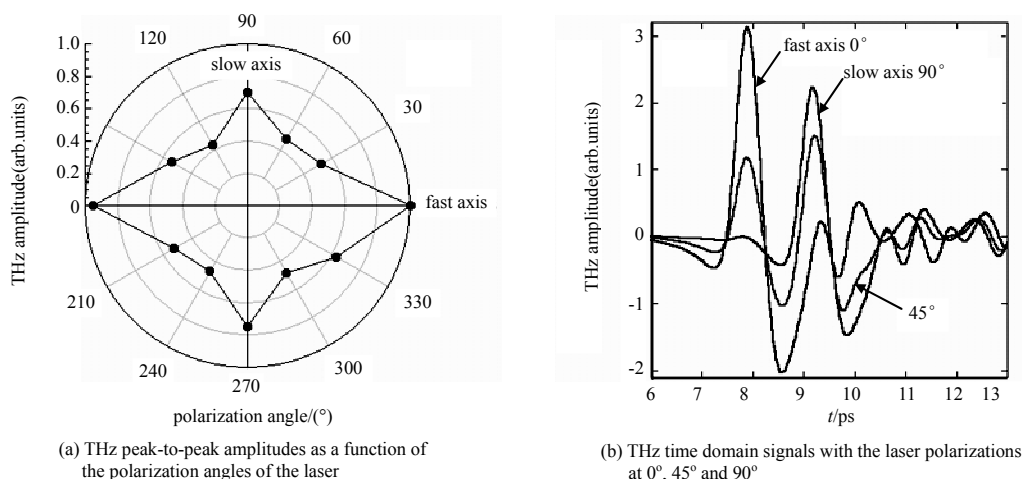


Fig.4 THz signals dependent on the laser polarizations

图4 受偏振影响的太赫兹信号

2.3 太赫兹光电导天线参数

带宽和动态范围是评价THz-TDS系统的2个重要指标,其中系统动态范围与太赫兹发射天线发射功率及接收天线噪声有关,实验中针对发射功率及接收天线噪声进行了参数优化。

太赫兹发射天线的辐射功率与施加于天线的偏压值及激发激光功率相关。实验中分别对发射天线施加80 V、60 V以及40 V的偏压,测量激发激光功率与太赫兹信号峰峰值幅度的关系,结果如图5所示。从图中可以看出,随着激光功率增加,太赫兹信号趋于饱和。这种饱和效应来源于衬底材料载流子激发特性,随激发激光功率增大,载流子浓度趋于饱和。根据P K Benicewicz等的研究^[16],太赫兹信号幅度与激光功率存在如下关系:

$$A \propto \frac{P_{\text{pump}} / P_{\text{sat}}}{1 + P_{\text{pump}} / P_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中: A 为太赫兹信号的幅度; P_{pump} 为激发激光功率; P_{sat} 为THz信号振幅强度达到饱和值的50%时的激光功率。根据式(2)进行数值拟合,得到 P_{sat} 在偏压为80 V、60 V、40 V下分别为8.4 mW、9.4 mW和25.3 mW。实验中,在保证飞秒脉冲不发生明显展宽的条件下,希望获得尽可能强的太赫兹发射。在实际光谱仪系统中,对发射天线选用80 V的偏压,以及16 mW的激发激光功率。

在太赫兹接收天线端,需同时考虑载流子饱和带来的接收电流饱和效应以及接收天线噪声两方面的影响。随着激发激光功率升高,接收到的太赫兹信号趋于饱和;另一方面,太赫兹光电导接收天线的噪声主要由衬底材料中的载流子热运动引起,即Johnson-Nyquist噪声^[17]。实验中测试随激光功率增加,接收到的太赫兹信号峰峰值幅度以及噪声电流的变化,结果如图6(a)所示。从图中可

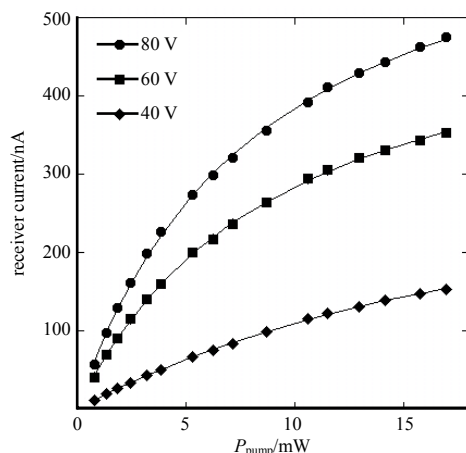


Fig.5 THz peak-to-peak amplitudes as a function of the laser power
图5 太赫兹信号峰峰值幅度与发射天线泵浦激光功率的关系

可以看出,接收信号幅度随激光功率增加趋于饱和,而噪声则随激光功率持续增加。值得注意的是,相对于采用800 nm波段激光激发的LT-GaAs太赫兹接收天线,其热噪声一般在几百fA量级,而以InGaAs材料为衬底的天线噪声大的多,可达数百pA量级。图6(b)显示了随激光功率增加,接收信号信噪比的变化,具有先上升后下降的趋势,信噪比在激光功率为8 mW左右达到最佳。所以,在光谱仪系统中,为获得最佳动态范围,接收天线选用8 mW的激光激发功率。

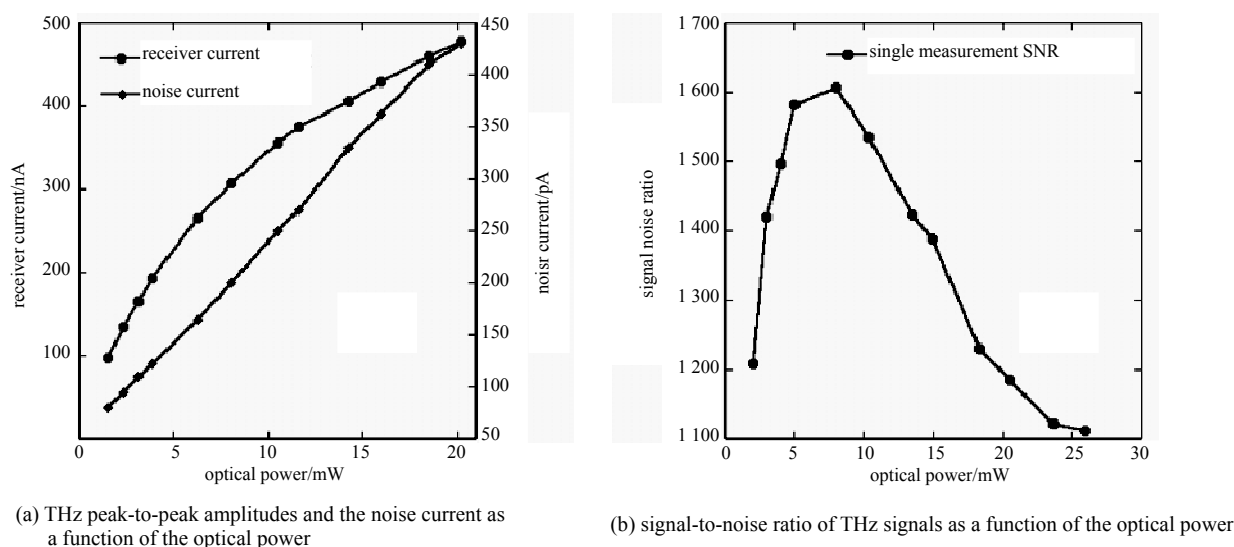


Fig.6 THz signals dependent on the laser powers
图6 激光激发功率与太赫兹信号的关系

3 系统性能

图7为光纤THz-TDS系统实物图,包括光纤飞秒激光器、光路模块和太赫兹模块。激光光路模块包括延迟扫描和光纤耦合等功能,太赫兹模块包括收发天线及太赫兹空间光路,系统采用音圈电机进行快速扫描,扫描频率为3 Hz。整个系统置于400 mm×400 mm光学面包板上,其中光路模块尺寸仅为250 mm×90 mm×50 mm,系统整体质量为12.3 kg。

系统中,对太赫兹发射天线施加80 V的偏压,太赫兹发射天线和接收天线的激发激光功率分别为16 mW和8 mW。系统性能如图8所示,图8(a)为扫描100次采集的太赫兹时域信号进行平均得到的结果,测量时间约为30 s。

图8(b)为经过傅里叶变换的太赫兹频域谱,从图中可以看出,太赫兹频谱宽度达到约4.5 THz,在保持激发激光的情况下,遮挡太赫兹光路,可以得到系统噪声水平,如图所示,系统动态范围可达70 dB。图8(b)中光谱尖峰由空气中水气吸收造成。

在太赫兹时域光谱仪的工业及产业应用中,仪器在移动、振动条件,以及温度变化条件下的稳定性具有重要意义。本文针对仪器振动及温度变化场景进行了稳定性测试。测试中分别使用垂直震动平台(深圳有德科技)及恒温恒湿试验机(深圳瑞泰尔)模拟机械振动及温度变化场景。机械振动方面,进行垂直振动测试,振动频率范围15~150 Hz,振动幅度约为0.5 mm,每个振动频率持续时长5 min;温度变化方面,范围为8~40 ℃,在每个温度条件下,系统暴露时间1 h。测试结果如图9所示,从图9(a)可见,光纤THz-TDS系统具有很好的机械稳定性,在振动条件下,太赫兹信号幅度变化小于0.5%,其原因在于光纤型光谱仪仅使用少量自由空间光路元件,受机械运动影响小。太赫兹信号幅度随温度变化的结果见图9(b),由图可见,在8~40 ℃范围内,太赫兹信号幅度变化约在20%范围内,对系统动态范围影响小于2 dB,具有较好的温度稳定性。然而,对比机械振动,温度对系统影响更大,其原因在于随着温度变化,系统的铝制基板及其他元件存在热胀冷缩,导致激光耦合偏差,功率变化。

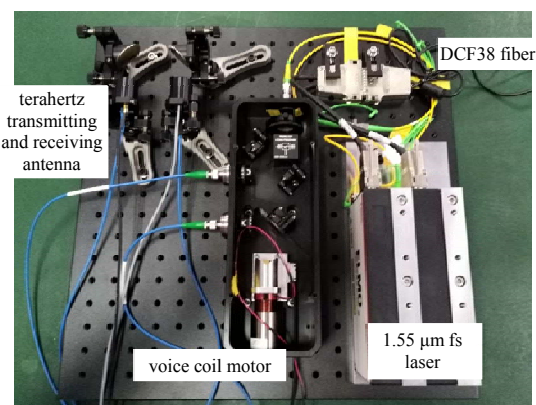


Fig.7 Photograph of the THz-TDS system
图7 太赫兹时域光谱仪实物

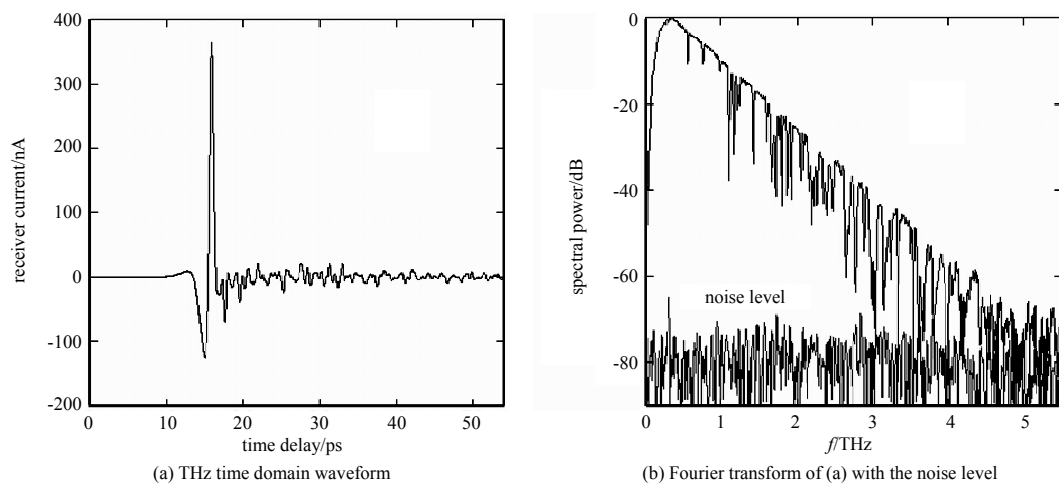


Fig.8 Time-domain and frequency-domain THz signals

图8 太赫兹时域和频域信号

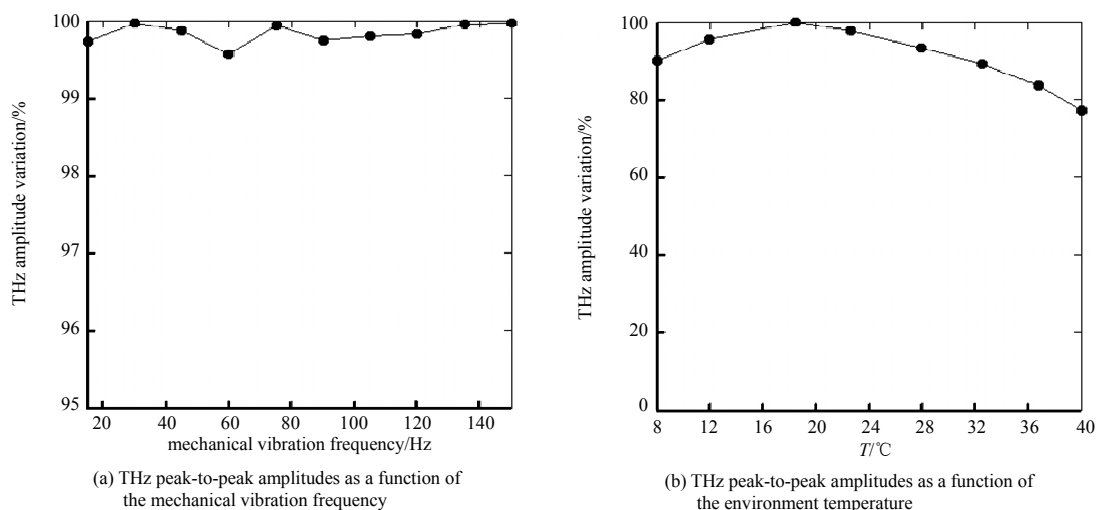


Fig.9 Results of the system reliability test

图9 系统可靠性测试结果

4 结论

本文详细阐述了基于1 550 nm波段飞秒激光激发的光纤太赫兹时域光谱仪的系统设计。通过精确裁剪正常色散光纤长度,可以很好地补偿单模保偏光纤造成的群速度色散。此外,降低飞秒脉冲能量,抑制自相位调制非线性效应可以进一步优化激光脉冲宽度。为提高系统稳定性和紧凑性,在光路模块中设置了THz-TDS组件,包含快速延迟扫描、偏振控制和光纤耦合。本THz-TDS光谱范围大于4.5 THz,动态范围优于70 dB,成谱扫描频率为3 Hz。实验证明系统在环境温度8~40 °C内动态范围变化小于2 dB,展示了较好的鲁棒性,可适应工业产业应用需求。

参考文献:

- [1] JEPSEN P U, COOKE D G, KOCH M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012,5(1):124-166.
- [2] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science Technology, 2005,20(7):S266-S280.
- [3] HO L, PEPPER M, TADAY P. Terahertz spectroscopy: signatures and fingerprints[J]. Nature Photonics, 2008,2(9):541-543.
- [4] LLOYDHUGHES J, JEON T I. A Review of the terahertz conductivity of bulk and nano-materials[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2012,33(9):871-925.

- [5] VIEWEG N, RETTICH F, DENINGER A, et al. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, 35(10):823–832.
- [6] HAN S P, KIM N, KO H, et al. Compact fiber-pigtailed InGaAs photoconductive antenna module for terahertz-wave generation and detection[J]. Optics Express, 2012, 20(16):18432–18439.
- [7] 袁英豪, 周正. Mini-T 系列便携式实时太赫兹光谱仪的设计与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6):909–915. (YUAN Yinghao, ZHOU Zheng. Design and application of mini-T series portable real-time terahertz spectrometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(6):909–915.)
- [8] ADAMONIS J, ARLAUSKAS A, KROTKUS A. Spectral measurements of picosecond photoconductivity in terahertz detectors made from low temperature grown GaAs and GaInAs[J]. Physica Status Solidi, 2015, 212(9):2080–2084.
- [9] SARTORIUS B, STANZE D, GERHARD M, et al. THz generation at 1.55 μm excitation: six-fold increase in THz conversion efficiency by separated photoconductive and trapping regions[J]. Optics Express, 2011, 19(27):25911–25917.
- [10] MITTENDORFF M, XU M, DIETZ R J, et al. Large area photoconductive terahertz emitter for 1.55 μm excitation based on an InGaAs heterostructure[J]. Nanotechnology, 2013, 24(21):214007.
- [11] DIETZ R J B, GLOBISCH B, GERHARD M, et al. 64 μW pulsed terahertz emission from growth optimized InGaAs/InAlAs heterostructures with separated photoconductive and trapping regions[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6):124–127.
- [12] ELLRICH F, WEIHLAND T, MOLTER D, et al. Compact fiber-coupled terahertz spectroscopy system pumped at 800 nm wavelength[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(5):053102.
- [13] WEINER A M. Ultrafast optics[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [14] SINGH S P, SINGH N. Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2007(73):249–275.
- [15] FAN S, PARRORTT E P J, PICKWELL-MACPHERSON E. Removing the double-pulse problem in polarization maintaining fiber delivery of femtosecond laser in terahertz systems[C]// 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Wollongong, NSW, Australia: IEEE, 2012:1–2.
- [16] BENICEWICZ P K, TAYLOR A J. Scaling of terahertz radiation from large-aperture biased InP photoconductors[J]. Optics Letters, 1993, 18(16):1332–1334.
- [17] WANG N, JARRAHI M. Noise analysis of photoconductive terahertz detectors[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2013, 34(9):519–528.

作者简介:



潘 奕(1986–), 男, 山西省临汾市人, 博士, 主要研究方向为太赫兹时域光谱学、超快光学等, email: panyi@huaxunchina.cn.

郑 渚(1984–), 男, 黑龙江省大庆市人, 博士, 主要研究方向为太赫兹科学与技术、光学、太赫兹及毫米波通信等.

李 程(1989–), 男, 江苏省淮安市人, 博士, 主要研究方向太赫兹通信等.

邓仕发(1989–), 男, 湖南省永州市人, 工程师, 主要研究方向为信号处理.

何坚兵(1986–), 男, 湖南省郴州市人, 工程师, 主要研究方向为太赫兹时域光谱仪、红外检测器等.

丁 庆(1961–), 男, 江苏省苏州市人, 工程师, 主要研究方向为太赫兹技术、太赫兹通信等.

姚 勇(1964–), 男, 哈尔滨市人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为光电子技术、光纤光学与光通信技术、光学检测技术等.