

# 光纤型变角度太赫兹时域光谱测量系统研究

李正<sup>1,2</sup>, 孙青<sup>2\*</sup>, 冯美琦<sup>2</sup>, 尚亮<sup>1</sup>, 邓玉强<sup>2</sup>, 李超辰<sup>2</sup>

1. 曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165

2. 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

**摘要** 太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术是一种非常有效的相干光谱探测技术, 被广泛应用于材料特性分析、爆炸物探测、医学诊断以及气体检测等众多领域。传统 THz-TDS 系统采用钛宝石飞秒激光器作为光源, 体积大、成本高, 限制了 THz-TDS 的大规模应用。光纤激光技术近年来发展迅速, 光纤飞秒激光器近年来已实现商用, 尤其是掺铒光纤飞秒激光器, 具有成本低、体积小、稳定性好等优点。采用全光纤的设计方案, THz-TDS 系统可设计的非常紧凑和灵活, 同时由于飞秒激光在光纤中传输, 大大提高了系统的抗环境干扰能力, 在工业和现场测量方面具有巨大的应用潜力。但另一方面, 由于色散展宽、偏振方向不匹配等效应的影响, 会对 THz-TDS 系统的性能造成严重影响, 需要在系统设计时充分考虑。本文设计研制了光纤型 THz-TDS 系统, 对光学、电学和软件三个子系统分别进行了简要介绍。通过插入色散补偿光纤进行色散管理实现了飞秒脉冲宽度的控制, 使得到达太赫兹光电导天线的飞秒脉冲宽度保持在 50 fs 左右, 从而消除了因飞秒脉冲展宽导致的太赫兹时域脉冲展宽。通过对飞秒激光偏振态的精确控制, 使泵浦激光和探测激光偏振方向与保偏光纤的快轴或慢轴保持平行, 避免飞秒脉冲同时沿快慢轴传输导致到达太赫兹天线的存在先后, 从而消除了太赫兹时域脉冲的分裂现象, 获得了信噪比优于 12 000 的单脉冲太赫兹时域波形。采用变角度光路结构设计, 实现了太赫兹透、反射光谱测量的便捷切换, 以及变角度太赫兹光谱的测量, 给 THz-TDS 系统的应用带来了很大的方便。

**关键词** 太赫兹; 时域光谱; 变角度; 光纤型; 光电导天线

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3379-05

## 引言

太赫兹波在电磁波谱中位于红外与毫米波之间, 因其独特的性质在很多领域具有重要的应用潜力。太赫兹时域光谱 (Terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 技术是一种非常有效的相干光谱探测技术, 被广泛应用于材料特性分析、爆炸物探测、医学诊断以及气体检测等众多领域<sup>[1-4]</sup>。

传统基于钛宝石飞秒激光器的 THz-TDS 系统已经发展的非常成熟, 但是随着测量需求的多样化, 传统的测量系统逐渐表现出其局限性。光纤激光技术近年来发展迅速, 光纤飞秒激光器近年来已实现商用, 尤其是掺铒光纤飞秒激光器, 具有成本低、体积小、稳定性好等优点。将钛宝石飞秒激光器替换为光纤飞秒激光器, THz-TDS 系统的成本与体积可大大降低。然而工作在 800 nm 波段的低温生长砷化镓

光电导天线在 1 550 nm 波段并不适用, 德国科学家采用低温生长的磷化铟作为光电导天线衬底材料, 同时采用 In-GaAs/InAlAs 多层异质结构, 实现了 1 550 nm 波段的太赫兹高效产生和探测<sup>[5-7]</sup>。采用全光纤的设计方案, THz-TDS 系统可设计的非常紧凑和灵活<sup>[8-10]</sup>。由于飞秒激光在光纤中传输, 大大提高了系统的抗环境干扰能力, 在工业和现场应用上具有巨大的潜力。但另一方面, 由于色散展宽、偏振不匹配等效应的影响, 会对 THz-TDS 系统性能造成严重影响, 需要在系统设计时充分考虑。

本文设计研制了光纤型 THz-TDS 系统, 通过光纤色散管理与偏振控制, 实现了飞秒脉冲宽度和偏振态的精确操控, 消除了太赫兹时域脉冲的展宽与分裂现象, 获得了高信噪比的单脉冲太赫兹时域波形; 采用变角度光路结构设计, 实现了太赫兹透射与反射光谱的变角度测量。

收稿日期: 2019-10-09, 修订日期: 2020-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200306), 国家自然科学基金项目(61205099, 11834777)资助

作者简介: 李正, 1992年生, 曲阜师范大学物理工程学院硕士研究生 e-mail: 986783867@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: sunqing@nim.ac.cn

## 1 总体方案设计

图 1 为光纤型 THz-TDS 总体设计方案, 主要包括光学、电学和软件三个子系统。光子学系统包括光纤飞秒激光器、色散补偿模块、偏振控制模块、光纤延迟线以及太赫兹发射与探测天线, 所有模块均采用光纤连接。电子学系统中的方波信号产生与高压调制模块用于为太赫兹发射天线施加方波

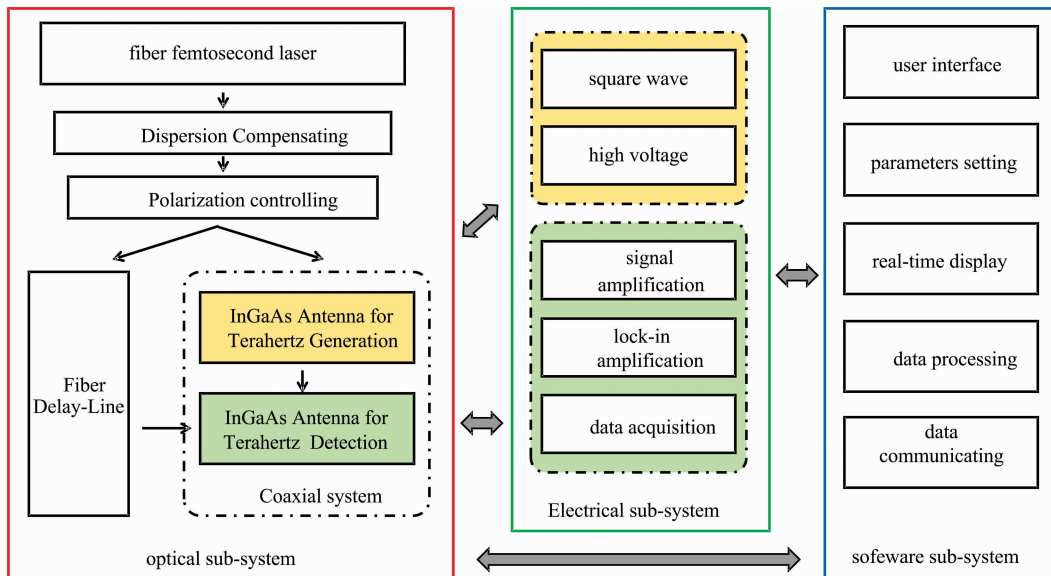


图 1 光纤型太赫兹时域光谱仪总体方案框图

Fig. 1 Logic diagram of fiber-type THz-TDS

图 2 为光纤型 THz-TDS 原理结构图。采用德国 Toptica 公司的掺铒光纤飞秒激光器作为泵浦探测光源, 其工作中心波长为 1 550 nm, 输出脉冲宽度约为 50 fs。飞秒激光经单模保偏光纤 (polarization maintaining fiber, PMF) 输出后进入色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber, DCF), 然后经过偏振分光棱镜 (polarization beam splitter, PBS) 后为两束, 其中一束耦合至太赫兹发射天线 (Tx) 的尾纤, 另一束经过电动光纤延迟线 (motorized delay line, MDL) 后耦合至太赫兹探

测天线 (Rx)。MDL 可提供最大 17 cm 的光路延迟, 对应的延迟时间为 560 ps。Tx 和 Rx 为基于 InGaAs/InAlAs 层叠结构的光电导天线, 尾纤为长度约 1 m 的 PMF。

## 2 光子学系统设计与实现

### 2.1 色散管理

实验中所采用的 PMF 在 1 550 nm 波段的色散参数约为 15 ps/nm/km, 飞秒激光在其中传输时由于色散效应脉冲宽度会显著展宽。图 3 为利用自相关仪测量得到的飞秒激光经过不同长度 PMF 后的自相关曲线。初始脉冲宽度为 50 fs 的飞秒脉冲经过 1~5 m 长度的 PMF 后, 脉冲宽度分别展宽为 84, 91, 99, 103 和 140 fs, 这也会导致太赫兹时域脉冲波形相应的展宽。为了获得更窄的太赫兹时域脉冲波形和更宽的太赫兹频域光谱, 需要到达 Tx 和 Rx 的飞秒脉冲宽度尽量窄, 因此采用在系统中增加 DCF 的方法进行色散管理, 该方法具有插入损耗小、简单易行等优点。

实验中使用的 DCF 在 1 550 nm 波段的色散参数约为 -40 ps/nm/km, Tx 与 Rx 之前的 PMF 总长度均约为 2 m, 经过理论计算后选取长度适合的 DCF 与 PMF 连接。图 4 为同时经过 DCF 与 2 m 长 PMF 后的飞秒脉冲自相关曲线。从图中可以看出, 增加 DCF 后飞秒脉冲宽度得到了压缩, 主脉冲宽度与直接从激光器出射的脉冲宽度基本一致。但是由于

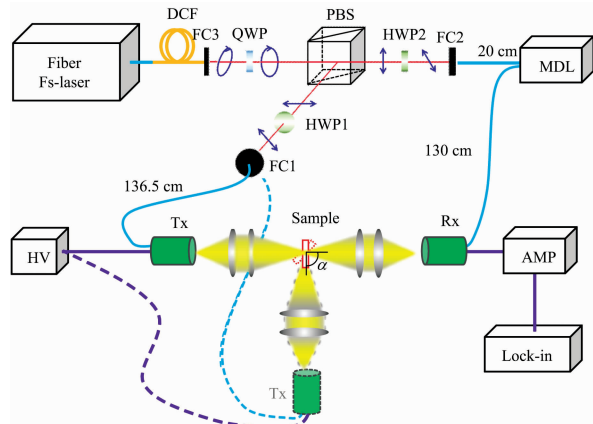


图 2 光纤型太赫兹时域光谱仪原理结构图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber-type THz-TDS

高阶色散难以补偿的原因,自相关曲线中出现了旁瓣。

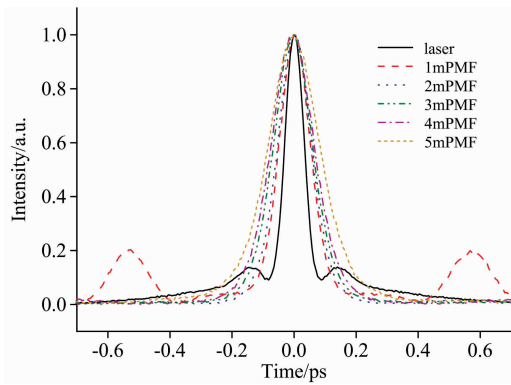


图 3 飞秒脉冲通过不同长度的 PMF 后的自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation curve after femtosecond pulse passing through different lengths of PMF

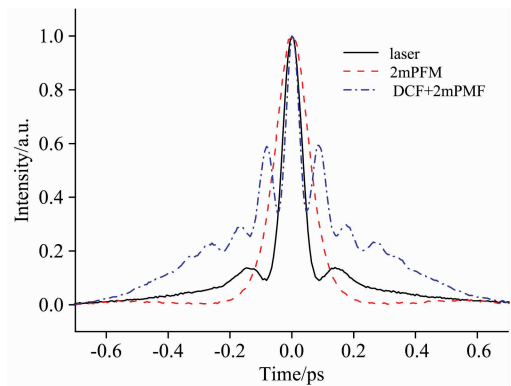


图 4 经过 DCF 和 PMF 后测得的脉冲自相关曲线

Fig. 4 Autocorrelation curve after femtosecond pulse passing through DCF and PMF

## 2.2 偏振控制

由于 DCF 为非保偏光纤,经过 DCF 后飞秒激光的偏振态将由线偏振退化为椭圆偏振,调节四分之一波片(QWP)使其变为圆偏振光,经过 PBS 后分为偏振方向相互垂直的两束线偏振光。当激光偏振方向不与 PMF 快轴或慢轴平行时,激光同时沿 PMF 的快慢轴传输<sup>[11-12]</sup>。由于 PMF 快慢轴折射率存在的微小的差别,导致激光沿两个轴的传输速度存在差异,同一飞秒脉冲到达太赫兹天线的存在先后,造成太赫兹时域波形脉冲分裂、强度降低等问题,对 THz-TDS 系统的性能产生严重影响<sup>[13-14]</sup>。

图 5(a)为进入 Tx 的泵浦激光偏振角度分别为 30°和 120°,进入 Rx 的探测激光偏振角度分别为 60°和 150°时的太赫兹时域脉冲波形。此时泵浦激光和探测激光的偏振方向与 PMF 快慢轴夹角均为 45°,激光能量在快慢轴方向占比均为 50%。从图中可以看出,太赫兹时域波形分裂为三峰结构。图 5(b)为对应的太赫兹频域光谱,光谱曲线中出现了多处凹陷,造成测量动态范围的大幅降低,严重影响了 THz-TDS 的性能。

为了消除激光偏振引起的太赫兹脉冲分裂需要对激光偏

振态进行精确控制。旋转二分之一波片(HWP)可实现对线偏振光偏振方向的控制。图 6(a)为进入 Tx 的激光偏振态为 75°或 165°,进入 Rx 的激光偏振态为 15°或 105°时的太赫兹时域脉冲波形,此时泵浦激光和探测激光偏振方向与 PMF 的快轴或慢轴平行。从图中可以看出,太赫兹时域波形都没有出现脉冲分裂现象,且太赫兹时域波形信号的峰值强度更大,信噪比优于 12 000。峰值位置分别位于 6.62, 8.44, 8.62 和 10.44 ps,延迟量与理论计算结果吻合,分别对应泵浦激光和探测激光沿快轴或慢轴传输时的四种情况。图 6(b)中的光谱曲线也未出现凹陷,光谱包络较平滑。

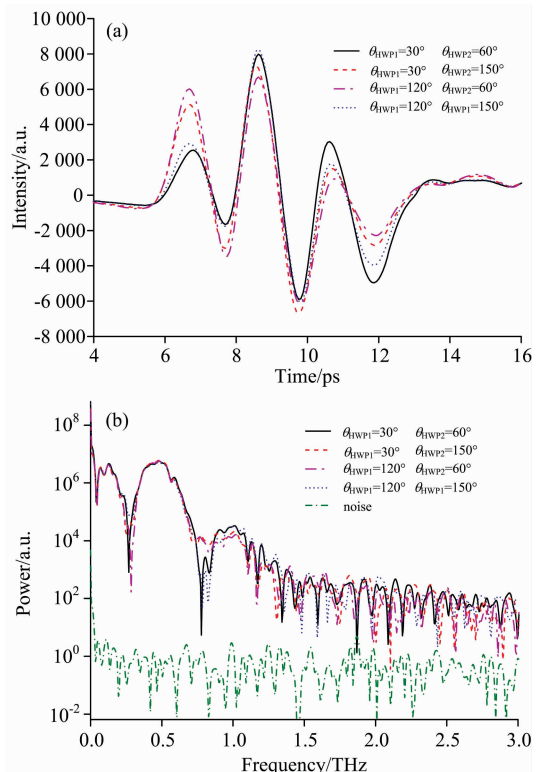


图 5 泵浦激光和探测激光偏振方向与 PMF 快慢轴夹角为 45°时的太赫兹信号

(a): 太赫兹时域波形; (b): 频域光谱

Fig. 5 The terahertz signal when the angle of the polarization direction of the pump laser or the detect laser between PMF's fast axis or slow axis are 45°

(a): The terahertz time-domain waveforms;

(b): Frequency-domain spectrum

## 2.3 变角度测量光路设计

由于飞秒激光在光纤中传输,给 THz-TDS 系统的光路设计带来很大的灵活性。系统中太赫兹光路采用 8f 结构设计,即包含四片太赫兹透镜, Tx, Rx 以及太赫兹透镜均安装在燕尾导轨上,燕尾导轨的一臂固定,另一臂可以样品为中心旋转,两臂夹角调节范围为 70°~180°,如图 7 所示。无需增加光学模块或器件,仅仅旋转活动臂,即可实现太赫兹透、反射光谱测量的功能切换,以及变角度太赫兹光谱的测量,这给 THz-TDS 系统的应用带来了很大的方便。

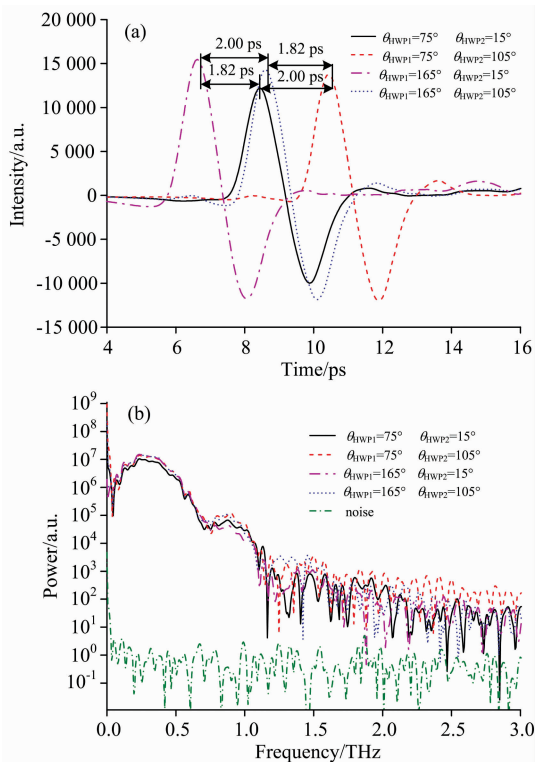


图 6 泵浦激光和探测激光偏振方向与 PMF 的快轴或慢轴平行时的太赫兹信号

(a): 太赫兹时域波形; (b): 频域光谱

Fig. 6 The terahertz signal when the polarization direction of the pump laser and the polarization direction of the detect laser are parallel to the PMF's fast or slow axis

(a): The terahertz time-domain waveforms;

(b): Frequency-domain spectrum

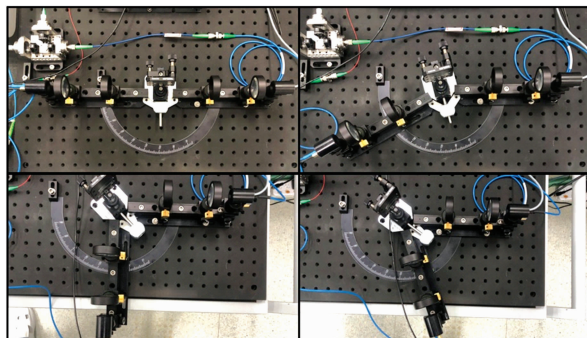


图 7 变角度测量光路实物图

Fig. 7 Photo of variable angle measurement optical path

### 3 结论

设计研制了光纤型 THz-TDS 系统, 通过光纤色散管理实现了飞秒脉冲宽度的控制, 使得到达太赫兹光电导天线的飞秒脉冲宽度保持在 50 fs 左右, 从而消除了因飞秒脉冲展宽导致的太赫兹时域脉冲展宽。通过对飞秒激光偏振态的精确控制, 使泵浦激光和探测激光偏振方向与保偏光纤的快轴或慢轴保持平行, 从而消除了太赫兹时域脉冲的分裂现象。采用变角度光路结构设计, 实现了太赫兹透、反射光谱测量的便捷切换, 以及变角度太赫兹光谱的测量。

### References

- [1] Tong J C, Qu Y, Suo F, et al. Photonics Research, 2019, 7(1): 89.
- [2] Wang B Z, Fan B H, Zhou D W, et al. Photonics Research, 2019, 7(6): 652.
- [3] Vibhu S, Prateek M, Sunny. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100401.
- [4] HE Ming-xia, SUN Long-ling, CHEN Da, et al(何明霞, 孙珑玲, 陈 达, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(12): 3731.
- [5] Roman J B D, Marina G, Dennis S, et al. Optics Express, 2011, 19(27): 25911.
- [6] Roehle H, Dietz R J B, Hensel H J, et al. Optics Express, 2010, 18(3): 2296.
- [7] Sartorius B, Künzel H, Biermann K, et al. Optical Terahertz Science and Technology, 2007.
- [8] Vieweg N, Rettich F, Deninger A, et al. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, 35(10): 823.
- [9] Sartorius B, Roehle H, Künzel H, et al. Optics Express, 2008, 16(13): 9565.
- [10] Ohno Y, Inoue R, Tonouchi M. IEEE. International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2006. 293.
- [11] Kaminow I P. Applied Scientific Research, 1984, 41(3): 257.
- [12] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1071.
- [13] FENG Mei-qi, SUN Qing, DENG Yu-qiang, et al(冯美琦, 孙 青, 邓玉强, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2019, 46(6): 0614019.
- [14] Fan S, Parrott E P J, Pickwell M E. International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2012. 1.

# Research on Variable Angle Fiber-Type Terahertz Time-Domain Spectrometer

LI Zheng<sup>1,2</sup>, SUN Qing<sup>2\*</sup>, FENG Mei-qi<sup>2</sup>, SHANG Liang<sup>1</sup>, DENG Yu-qiang<sup>2</sup>, LI Chao-chen<sup>2</sup>

1. School of Physics and Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China

2. Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) technology is widely used in many fields such as material composition identification, explosive detection, drug and drug composition analysis, and medical diagnosis. The traditional THz-TDS uses a Ti: sapphire femtosecond laser as a light source, which is bulky and costly, and limits the large-scale application of THz-TDS. Using a fiber femtosecond laser combined with a fiber-coupled terahertz photoconductive antenna, the THz-TDS system can be designed to be very compact and flexible, while eliminating the need for a free-space optical path, greatly reducing the number of optical mounts. The influence of external environment on the signal such as vibration has great application potential in industry and in the field. In this paper, a fiber-type THz-TDS system is designed and developed, and the three subsystems of optics, electricity and software are briefly introduced. The femtosecond pulse width is controlled by fiber dispersion management, so that the femtosecond pulse width of the terahertz photoconductive antenna is kept at about 50 fs, thereby eliminating the terahertz time domain pulse broadening caused by femtosecond pulse broadening. By precisely controlling the polarization state of the femtosecond laser, the polarization direction of the pump laser and the detection laser is kept parallel with the fast or slow axis of the polarization maintaining fiber, thereby eliminating the splitting phenomenon of the terahertz time domain pulse and obtaining the signal to noise ratio. Better than 12 000 single-pulse terahertz time domain waveforms. The variable angle optical path structure design enables easy switching of terahertz transmission spectrum measurement and reflection spectrum measurement, as well as the measurement of variable angle terahertz spectrum.

**Keywords** Terahertz; Time-domain spectroscopy; Variable angle; Fiber-type; Photoconductive antenna

(Received Oct. 9, 2019; accepted Mar. 6, 2020)

\* Corresponding author