

# 激光偏振态对光纤型太赫兹时域光谱仪的影响

冯美琦<sup>1,2</sup>, 孙青<sup>2\*</sup>, 邓玉强<sup>2</sup>, 丁晴<sup>3</sup>, 李超辰<sup>2</sup>, 赵昆<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国石油大学(北京)油气光学探测技术北京市重点实验室, 北京 102249;

<sup>2</sup> 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029;

<sup>3</sup> 中国标准化研究院资源与环境分院, 北京 100191

**摘要** 采用光纤飞秒激光器与光纤耦合型太赫兹光电导天线相结合的方案,设计并研制了光纤型太赫兹时域光谱系统。通过实验研究了激光偏振态对太赫兹时域波形、强度以及光谱特性的影响,通过对飞秒激光偏振态的精确控制与优化,消除了时域脉冲分裂现象,获得了高信噪比的单脉冲太赫兹时域波形。

**关键词** 探测器; 太赫兹时域光谱; 激光偏振; 光纤型太赫兹时域光谱仪; 光电导天线

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614019

## Influence of Laser Polarization on Fiber-Type Terahertz Time-Domain Spectrometer

Feng Meiqi<sup>1,2</sup>, Sun Qing<sup>2\*</sup>, Deng Yuqiang<sup>2</sup>, Ding Qing<sup>3</sup>, Li Chaochen<sup>2</sup>, Zhao Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

<sup>2</sup> Division of Optics and Laser Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

<sup>3</sup> Resource and Environment Branch, China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China

**Abstract** A fiber-type terahertz (THz) time-domain spectrometer is designed by combining a fiber femtosecond laser with a fiber-coupled THz photoconductive antenna. The effect of laser polarization on the THz time-domain waveform, intensity, and spectral characteristics are studied experimentally. Via the precise control and the optimization of the polarization state of the femtosecond laser, the time-domain pulse splitting is eliminated, and a single-peak THz time-domain pulse with a high signal-to-noise ratio is obtained.

**Key words** detectors; terahertz time-domain spectroscopy; laser polarization; fiber-type terahertz time-domain spectrometer; photoconductive antenna

**OCIS codes** 040.2235; 300.6495; 060.2420; 260.5430

## 1 引言

太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术在过去 30 年内发展迅速,被广泛应用于物质成分识别、爆炸物探测、毒品药品成分分析、产品质量控制以及医学诊断等领域<sup>[1-5]</sup>。目前,绝大部分的太赫兹时域光谱系统都采用中心波长在 800 nm 附近的钛宝石飞秒激光器作为抽运探测光源,然而钛宝石飞秒激光器的体积较大、价格昂贵、对环境要求高,限制了太赫

兹时域光谱仪在工业和现场的大规模应用。

得益于光通信技术与光纤激光技术的迅速发展,1550 nm 波段的掺铒光纤飞秒激光器近年来已进入实用阶段,且其具有体积小、价格便宜、受环境影响小等优点,若采用光纤飞秒激光器来替代钛宝石飞秒激光器,可大大降低太赫兹时域光谱系统的体积与成本。但常规的低温生长砷化镓(LT-GaAs)光电导天线在 1550 nm 波段不适用,因此,德国研究人员将低温生长的钢镓砷(InGaAs)作为光

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2018-12-04; 录用日期: 2018-12-18

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0200306, 2018YFF0212402)、国家自然科学基金(61205099, 11834777)、中国计量科学研究院基本科研业务费项目(AKY1404)、上海市科学技术委员会项目(15DZ0500104)

\* E-mail: sunqing@nim.ac.cn

电导天线衬底材料,同时采用多层异质结构,不仅有效改善了 1550 nm 波段的太赫兹产生和探测效率<sup>[6-10]</sup>,还将光电导天线与光纤耦合系统集成为一体的结构。

采用光纤飞秒激光器与光纤耦合型太赫兹光电导天线相结合的方案,太赫兹时域光谱系统可以设计得非常紧凑、小巧和灵活<sup>[11-13]</sup>,同时由于没有自由空间光路,省去了大量的光学调整架,大大降低了振动等外界环境对信号的影响,在工业上具有巨大的应用潜力。但是,飞秒激光在经过光纤传输后,色散、偏振以及非线性效应等会对脉冲品质产生不良影响,进而严重影响太赫兹时域光谱的时域波形、光谱宽度、信噪比等性能。在光纤系统中,最常用的色散补偿方式是在系统中增加色散补偿光纤(DCF),该方法具有插入损耗小、结构稳定等优点。但是,飞秒激光经过 DCF 后,其偏振态将由线偏振退化为椭圆偏振,激光分别沿保偏光纤的快慢轴传输。由于两种偏振模式的传输速度存在一定差异,因此会导致太赫兹时域波形出现脉冲分裂、强度降低等问题<sup>[14]</sup>,从而对太赫兹时域光谱系统的性能产生严重影响。

本文设计研制了光纤型太赫兹时域光谱系统,研究了激光偏振态对太赫兹时域波形、强度以及光谱特性的影响,通过对飞秒激光偏振态的精确控制与优化,消除了时域脉冲分裂现象,获得了高信噪比的单脉冲太赫兹时域波形。

## 2 原理与装置

图 1(a)、(b)分别为光纤型太赫兹时域光谱系统的光路原理图和实物装置图。采用光纤飞秒激光器(FemtoFerb 1560, Toptica)作为抽运探测光源,飞秒激光器输出激光的中心波长为 1550 nm,功率为 140 mW,脉冲宽度为 50 fs。飞秒激光经单模保偏光纤(SM/PMF)输出后进入长度为 0.6 m 的 DCF,然后进入偏振可调分束器套件,并分为两路,其中一路与太赫兹发射天线(Tx)的尾纤相连接,另一路经过电动可变光学延迟线(MDL)后与太赫兹探测天线(Rx)相连接。MDL 可提供长达 17 cm 的光路延迟,对应最大延迟时间为 560 ps,具有 1 fs 精度的延迟分辨率,可利用内置的 RS-232 端口对其进行控制。Tx 和 Rx 为基于多层 InGaAs/InAlAs 材料的尾纤封装型光电导天线,尾纤为长度约 1 m 的单模保偏光纤,工作波长为 1550 nm。Tx 呈带状线结构,其间隙为 100  $\mu\text{m}$ ,对 Tx 施加调制频率为 3 kHz 的方波高压信号(HV);Rx 呈偶极子结构,该结构长为 25  $\mu\text{m}$ ,其间隙为 10  $\mu\text{m}$ 。Rx 的输出信号经电流放大器(AMP)后进入锁相放大器。Tx、Rx 以及太赫兹透镜均安装在可旋转的调整架上,可实现太赫兹透射光谱测量与反射光谱测量的切换,以及变角度太赫兹反射光谱的测量。系统中所有的光纤接口均为端面倾斜结构(APC),以避免光纤端面反射。

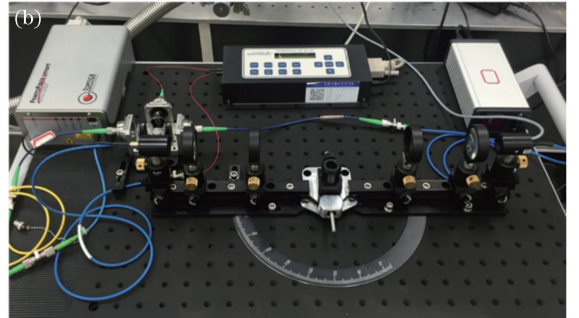
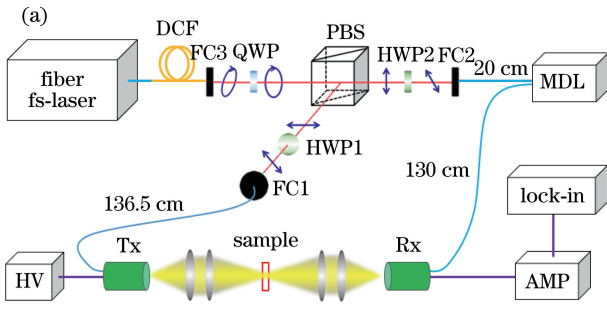


图 1 光纤型太赫兹时域光谱系统。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Fiber-type THz-TDS system. (a) Principle diagram; (b) physical map

偏振可调分束器套件由四分之一波片(QWP)、二分之一波片(HWP)、偏振分束器(PBS)以及光纤准直器(FC)组成。飞秒激光经过 DCF 后由线偏振变为椭圆偏振,调节 QWP 使其变为圆偏振,经过 PBS 后分为偏振方向相互垂直的两束线偏振光,旋转 HWP 可实现对线偏振光偏振方向的控制。由 HWP 的工作原理可知,当 HWP 旋转角度为  $\alpha$  时,

入射线偏振光偏振方向的旋转角度为  $2\alpha$ <sup>[15-16]</sup>。

## 3 偏振对太赫兹信号的影响

采用控制变量法,分别研究了进入 Tx 和 Rx 的激光偏振角度对太赫兹信号的影响。为了更加直观地表示实验结果,下文中的数据均为激光偏振方向的旋转角度。首先将 HWP2 的角度  $\theta_{\text{HWP2}}$  固定为

$0^\circ$ , 然后旋转 HWP1 的角度  $\theta_{\text{HWP1}}$ , 得到如图 2(a) 所示结果。由图 2(a) 可见, 太赫兹时域波形信号的峰值强度与峰值所在位置随进入 Tx 的激光偏振态角度的改变而发生明显变化: 随着激光偏振角度由  $75^\circ$  逐渐变为  $165^\circ$ , 在  $8.44 \text{ ps}$  处的太赫兹时域波形

信号峰值逐渐降低, 在  $6.62 \text{ ps}$  处的信号峰值则逐渐增强, 最终, 信号峰值由  $8.44 \text{ ps}$  处变为  $6.62 \text{ ps}$  处。图 2(b) 为信号峰值位于  $6.62 \text{ ps}$  处时信号峰值强度的占比雷达图, 可以看出, 信号强度呈周期性变化, 周期为  $180^\circ$ 。

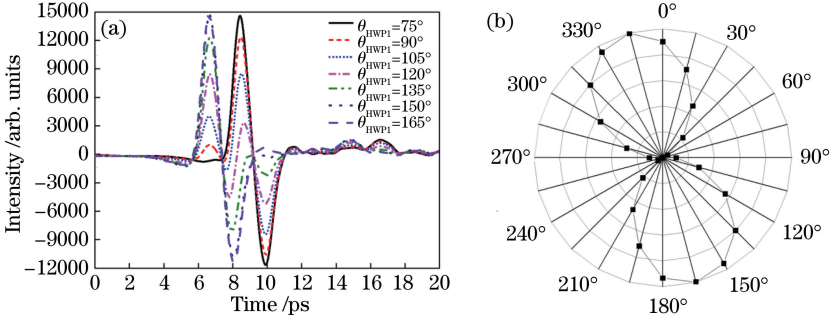


图 2  $\theta_{\text{HWP2}} = 0^\circ$  时, 抽运激光偏振角度对太赫兹时域波形的影响。(a) 太赫兹时域波形; (b) 太赫兹时域波形信号峰值在快轴处的占比雷达图

Fig. 2 Effect of pump laser polarization angle on THz time-domain waveform when  $\theta_{\text{HWP2}} = 0^\circ$ .

(a) THz time-domain waveforms; (b) radar map of peak ratio of THz time-domain waveform at fast axis

太赫兹时域光谱中所使用的保偏光纤 (PMF) 为熊猫型光纤 (PM1550, Corning), 存在相互垂直的快轴和慢轴, 且快慢轴的折射率差为  $\Delta n = 0.0004$ , 因此激光在两轴中的传输速度不同。Tx 前的 PMF 光纤长约  $136.5 \text{ cm}$ , 计算后可知激光沿快轴传输比沿慢轴传输快约  $1.82 \text{ ps}$ , 与实验结果中信号峰值位置的变化量相等。因此可以推断: 当进入 Tx 的抽运激光偏振角度为  $75^\circ$  和  $255^\circ$  时, 偏振方向与 PMF 慢轴平行, 激光能量沿慢轴传输, 传输速度稍慢, 太赫兹时域波形信号峰值位置位于  $8.44 \text{ ps}$  处; 而当抽运激光偏振角度为  $165^\circ$  和  $345^\circ$  时, 偏振方向与 PMF 快轴平行, 激光能量沿快轴传输, 传输

速度稍快, 太赫兹时域波形信号峰值位置位于  $6.62 \text{ ps}$  处; 当抽运激光的偏振角度为其他角度时, 偏振方向既不平行于快轴也不平行于慢轴, 激光能量同时沿快慢轴传输, 因此太赫兹时域波形出现双峰结构, 且两个峰值位置分别对应只沿快轴或慢轴传输时的信号峰值位置。

由此可见, 当进入 Tx 的激光只沿 PMF 快轴或慢轴传输时, 可以获得峰值强度更大、质量更高的太赫兹时域波形信号。因此, 将 HWP1 的角度分别固定为  $37.5^\circ$  和  $82.5^\circ$ , 即保持进入 Tx 的激光偏振角度为  $75^\circ$  和  $165^\circ$ , 然后旋转 HWP2, 得到如图 3 与图 4 所示的两组实验结果。

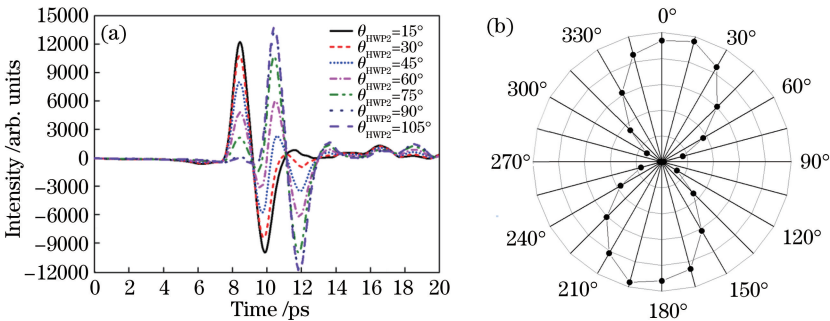


图 3  $\theta_{\text{HWP1}} = 75^\circ$  时, 探测激光偏振角度对太赫兹时域波形的影响。(a) 太赫兹时域波形; (b) 太赫兹时域波形信号峰值在快轴处的占比雷达图

Fig. 3 Effect of probe laser polarization angle on THz time-domain waveform when  $\theta_{\text{HWP1}} = 75^\circ$ .

(a) THz time-domain waveforms; (b) radar map of peak ratio of THz time-domain waveform at fast axis

在进入 Tx 的抽运激光的偏振角度为  $75^\circ$  的条件下, 随着进入 Rx 的探测激光的偏振角度由  $15^\circ$  逐

渐变为  $105^\circ$  时, 在  $8.44 \text{ ps}$  处的太赫兹时域波形信号峰值逐渐降低, 而在  $10.44 \text{ ps}$  处的信号峰值则逐

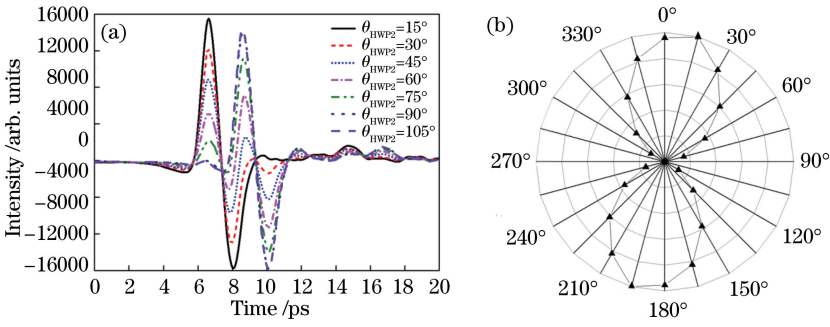


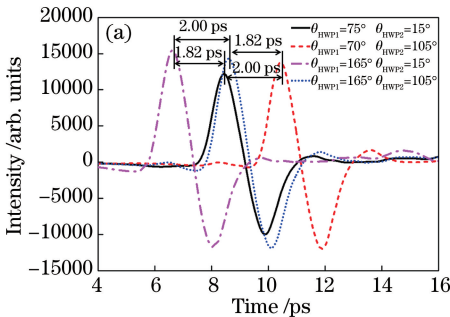
图4  $\theta_{\text{HWP1}}=165^\circ$ 时,探测激光偏振角度对太赫兹时域波形的影响。(a)太赫兹时域波形;  
(b)太赫兹时域波形信号峰值在快轴处的占比雷达图

Fig. 4 Effect of probe laser polarization angle on THz time-domain waveform when  $\theta_{\text{HWP1}}=165^\circ$ .

(a) THz time-domain waveforms; (b) radar map of peak ratio of THz time-domain waveform at fast axis

渐增强。在进入 Tx 的激光的偏振角度为  $165^\circ$  的条件下,随着进入 Rx 的激光的偏振角度由  $15^\circ$  逐渐变为  $105^\circ$  时,在 6.62 ps 处的太赫兹时域波形信号峰值逐渐降低,而在 8.62 ps 处的信号峰值则逐渐增强,信号峰值位置的变化量均为 2.00 ps。Rx 前的 PMF 光纤长约 150 cm,计算后可知激光沿快慢轴传输的时间延迟约为 2.00 ps,与实验结果相吻合。因此可以推断:当进入 Rx 的探测激光的偏振角度为  $15^\circ$  与  $195^\circ$  时,偏振方向与 PMF 快轴平行;而当进入 Rx 的探测激光偏振角度为  $105^\circ$  与  $285^\circ$  时,偏振方向与 PMF 慢轴平行;当探测激光的偏振角度为其他角度时,偏振方向既不平行于快轴,也不平行于慢轴,太赫兹时域波形同样出现双峰结构。

图 5(a)为进入 Tx 的抽运激光的偏振角度分别为  $75^\circ$  和  $165^\circ$ ,进入 Rx 的探测激光的偏振角度分别为  $15^\circ$  和  $105^\circ$  时的太赫兹时域波形,可见:太赫兹时域波形均未出现脉冲分裂现象,峰值位置分别位于 6.62, 8.44, 8.62, 10.44 ps 处,分别对应抽运激光和探测激光沿快轴或慢轴传输时的 4 种情况,对应关系如表 1 所示。关闭高压电源后的噪声信号强度为



2.25,太赫兹时域波形的信噪比约为 12000。图 5 (b)为对应的太赫兹频域光谱,光谱宽度约为 2.5 THz,动态范围优于 75 dB。

表 1 抽运激光和探测激光偏振方向与太赫兹时域波形峰值位置的对应关系

Table 1 Correspondence relationship between polarization direction of pump or probe laser and peak position of THz time-domain waveform

Polarization direction of pump laser	Polarization direction of detect laser	Peak position /ps
Fast axis	Fast axis	6.62
Slow axis	Fast axis	8.44
Fast axis	Slow axis	8.62
Slow axis	Slow axis	10.44

图 6(a)为进入 Tx 的抽运激光的偏振角度分别为  $30^\circ$  和  $120^\circ$ ,进入 Rx 的探测激光的偏振角度分别为  $60^\circ$  和  $150^\circ$  时的太赫兹时域波形和频域光谱。此时,抽运激光和探测激光的偏振方向与快慢轴的夹角均为  $45^\circ$ ,激光能量在快慢轴方向的占比均为 50%。从图中可见,太赫兹时域波形严重劣化,均出现了三峰结构。图 6(b)为对应的太赫兹频域光谱,

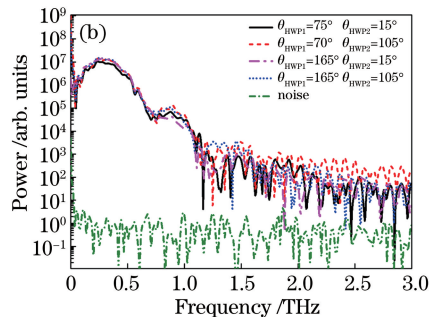


图 5 抽运激光和探测激光偏振方向与 PMF 快轴或慢轴平行时的太赫兹信号。(a)太赫兹时域波形;(b)频域光谱

Fig. 5 THz signals when polarization directions of pump laser and probe laser are parallel to fast or slow axis of PMF.

(a) THz time-domain waveforms; (b) frequency-domain spectra



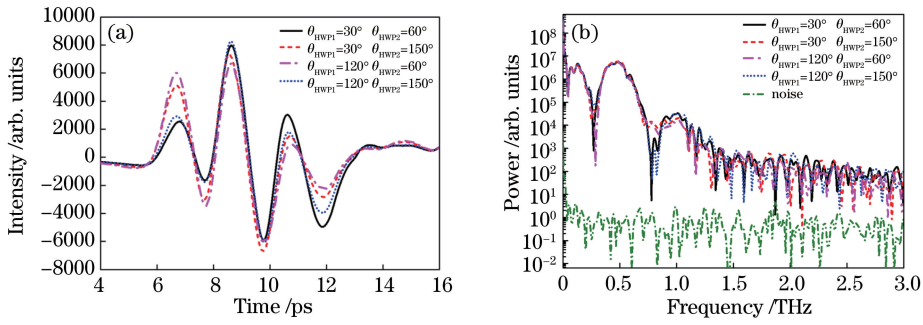


图 6 抽运激光和探测激光偏振方向与 PMF 快慢轴夹角为  $45^\circ$  时的太赫兹信号。(a) 太赫兹时域波形;(b) 频域光谱  
Fig. 6 THz signals when angle between polarization direction of pump or probe laser and fast or slow axis of PMF is  $45^\circ$ .

(a) THz time-domain waveforms; (b) frequency-domain spectra

光谱曲线中出现了多处严重凹陷,导致测量动态范围大幅降低,严重影响了太赫兹时域光谱的性能。

由此可见:当抽运光和探测光只沿 PMF 快轴或慢轴传输时,可以获得峰值强度更大、质量更高的太赫兹时域波形信号;当抽运光和探测光同时沿快轴和慢轴方向传输时,由于激光沿 PMF 快慢轴传输的速度存在差异,时域波形会出现脉冲分裂现象,呈现双峰或三峰结构。

## 4 结 论

本课题组设计研制了光纤型太赫兹时域光谱系统,系统地研究了激光偏振态对太赫兹时域波形、强度以及光谱特性的影响。实验发现:当抽运光和探测光的偏振方向与 PMF 快轴或慢轴平行时,即激光只沿快轴或慢轴方向传输时,可以获得强度最大、信噪比最高的单脉冲太赫兹时域波形,信噪比可达 12000 以上,同时也具有最好的光谱特性,光谱宽度可达 2.5 THz,动态范围优于 75 dB;当抽运光和探测光的偏振方向与快轴或慢轴不平行时,即激光同时沿快轴和慢轴方向传输时,由于激光沿 PMF 快慢轴传输的速度存在差异,时域波形会出现脉冲分裂现象,呈现双峰或三峰结构,频域光谱出现凹陷,太赫兹时域光谱性能严重下降。

## 参 考 文 献

[1] Ueno Y, Ajito K, Kukutsu N, *et al.* Quantitative analysis of amino acids in dietary supplements using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Analytical Sciences*, 2011, 27(4): 351-356.  
[2] Du S Q, Li H, Xie L, *et al.* Vibrational frequencies of anti-diabetic drug studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(14): 143702.  
[3] Ryu C H, Park S H, Kim D H, *et al.*

Nondestructive evaluation of hidden multi-delamination in a glass-fiber-reinforced plastic composite using terahertz spectroscopy [J]. *Composite Structures*, 2016, 156: 338-347.  
[4] Parrott E P J, Sun Y W, Pickwell-Macpherson E. Terahertz spectroscopy: its future role in medical diagnoses[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2011, 1006(1/2/3): 66-76.  
[5] Yang M W, Ji H B, Tan Z Y, *et al.* Terahertz joint analyzer with imaging and spectrum detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611004.  
杨旻蔚, 季海兵, 谭智勇, 等. 成像与成谱联动的太赫兹分析检测仪 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0611004.  
[6] Dietz R J B, Gerhard M, Stanze D, *et al.* THz generation at 1.55  $\mu\text{m}$  excitation: six-fold increase in THz conversion efficiency by separated photoconductive and trapping regions [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 25911-25917.  
[7] Roehle H, Dietz R J B, Hensel H J, *et al.* Next generation 1.5  $\mu\text{m}$  terahertz antennas: mesa-structuring of InGaAs/InAlAs photoconductive layers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2296-2301.  
[8] Sartorius B, Künzel H, Biermann K, *et al.* THz photoconductive antennas for 1.55  $\mu\text{m}$  telecom wavelengths [C] // *Optical Terahertz Science and Technology*, March 18-21, 2007, Orlando, Florida United States. Washington D. C.: OSA, 2007: ME6.  
[9] Yang Y, Sun Q, Deng Y Q, *et al.* Study on beat signal with high signal-to-noise ratio in terahertz frequency measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0604006.  
杨奕, 孙青, 邓玉强, 等. 太赫兹频率测量中高信噪比拍频信号的研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0604006.  
[10] Sun Q, Yang Y, Meng F, *et al.* High-precision measurement of terahertz frequency based on

- frequency comb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (4): 0412002.
- 孙青, 杨奕, 孟飞, 等. 基于频率梳的太赫兹频率精密测量方法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (4): 0412002.
- [11] Vieweg N, Rettich F, Deninger A, *et al.* Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(10): 823-832.
- [12] Sartorius B, Roehle H, Künzel H, *et al.* All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5  $\mu\text{m}$  telecom wavelengths [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9565-9570.
- [13] Ohno Y, Inoue R, Tonouchi M. Fiber-coupled compact terahertz system [C] // 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 14-14, 2005, Seoul, Korea. New York: IEEE, 2005: 293-296.
- [14] Fan S T, Parrott 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, September 23-28, 2012, Wollongong, NSW, Australia. New York: IEEE, 2012: 13192522.
- [15] Kaminow I P. Polarization-maintaining fibers [J]. *Applied Scientific Research*, 1984, 41 (3/4): 257-270.
- [16] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 1071-1089.