

快速扫描太赫兹时域光谱系统的研究进展

刘文权^{1,2} 鲁远甫^{1,2,*} 冯广智^{1,2} 龚小竞^{1,2} 杨 珺^{1,2} 张艳东^{1,2} 金 雷^{1,2}

(¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东, 深圳 518055)
(²中国科学院健康信息学重点实验室, 广东, 深圳 518055)

摘要 太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是一种新兴的光谱测量技术,是太赫兹(THz)领域的研究热点。传统THz-TDS系统利用步进的时间延迟线进行扫描,并通过锁相放大器获得THz信号。这种方法检测THz信号的速度有限,无法应用于某些要求快速测量的场合。而快速扫描THz-TDS系统可以实现THz信号的快速检测,易于进一步扩大其应用范围。总结介绍了快速扫描THz-TDS系统在国内外的代表性研究进展,对几种实现快速扫描的方案进行了分析比较,并提出了一定的改进方法。

关键词 光谱学;太赫兹;太赫兹时域光谱;快速扫描;快速检测

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.123001

Research Progress of Rapid Scan Terahertz Time Domain Spectroscopy System

Liu Wenquan^{1,2} Lu Yuanfu^{1,2} Feng Guangzhi^{1,2} Gong Xiaojing^{1,2}

Yang Jun^{1,2} Zhang Yandong^{1,2} Jin Lei^{1,2}

(¹ Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen, Guangdong 518055, China
² Key Laboratory for Health Informatics, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract It is noteworthy that terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) has been pioneered as a spectral measurement tool, which has drawn much attention in the field of terahertz (THz) wave. Conventional THz-TDS systems employ a stepped delay line for their optical delay line scan and utilize lock-in amplifier (LIA) for the acquisition of THz signals. In this approach, the speed of THz signals sampling is too slow to be introduced into some applications which require a high-speed performance. And the THz waveforms can be acquired in rapid scan THz-TDS system. Therefore, numerous practical applications for THz-TDS systems can be entered much more easily. In this review, we describe the technique for rapid scan THz-TDS and illustrate the various implementations of the technique with recent domestic and oversea examples. In addition, an improved method for rapid scan is proposed.

Key words spectroscopy; terahertz; terahertz time domain spectroscopy; rapid scan; fast measurement

OCIS codes 300.6495; 300.6190; 300.6500

1 引言

太赫兹(THz)波一般是指频率在0.1~10.0 THz的相干电磁辐射。它处于电磁波谱中电子学向光子学过渡的特殊位置,具有高透视性、高安全性、高光谱分辨率等独特的性质,具有重要的学术价值和应用前景^[1]。太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术能够同时探测THz波的振幅和相位信息,在生物学、材料科学、医学、军事以及物理、化学等许多领域展现出巨大的应用潜力,并已迅速发展成为一个令人关注的新兴研究方

收稿日期: 2011-08-08; **收到修改稿日期**: 2011-08-31; **网络出版日期**: 2011-10-13

基金项目: 深圳市科技研发资金(JC201005270343A)资助课题。

作者简介: 刘文权(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事太赫兹光谱及其成像等方面的研究。

E-mail: wq.liu@siat.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: yf.lu@siat.ac.cn

向。可以预见,其在未来的基础科学研究中发挥的作用是不可估量的^[2~7]。同时,作为一种新兴的光谱分析检测手段,THz-TDS技术的应用研究目前还显得很年轻。而如何实现 THz 脉冲的快速检测是其应用研究中亟需解决的主要问题之一。本文介绍了快速扫描 THz-TDS 系统在国内外的研究现状,提出了一定的改进方法。

2 快速扫描 THz-TDS 技术简述

2.1 传统 THz-TDS 系统的局限性

THz-TDS 技术是基于飞秒激光的抽运探测技术。在多数情况下,测量 THz 光谱时需要使用光学延迟线来得到时间取样。传统的 THz-TDS 系统(不管是基于光导天线^[8]还是电光采样^[9])普遍采用机械平移台所获取的扫描光学延迟线进行采样探测。因为基于超快飞秒激光的 THz 脉冲功率仍然非常低,所以为了提高灵敏度和抑制背景噪声,通常对抽运光进行调制,然后利用锁相探测技术获得 THz 信号电场振幅和相位的信息如图 1 所示。

通过机械平移台实现的光学延迟线装置可以实现很长的精确时间延迟,但由于其机械惯性而不能实现快速扫描,而且现有的锁相放大器(LIA)由于硬件本身的原因,在处理速度上也难以突破瓶颈。并且,对于传统的 THz-TDS 方法而言,测量时间的减少意味着系统信噪比也会相应地降低。为了获取高信噪比的信号,测量 THz 脉冲信号的时间往往比较长。如 Exter 等^[8]利用传统的 THz-TDS 精确测量了 0.20~1.45 THz 范围内水的吸收峰。为了获得信噪比为 3000 的 THz 脉冲信号,测量时系统采用的积分常数为 125 ms,扫描的时间窗口为 200 ps,结果显示该系统测量一个 THz 脉冲信号的时间为 10 min。显然,这无法满足某些快速实时测量场合的要求。测量时间过长成为限制 THz-TDS 系统扩大其应用范围的主要因素之一。

2.2 研究快速扫描 THz-TDS 系统的必要性

在实际应用中往往需要缩短 THz 脉冲的探测时间来减少系统中不利因素的影响,如长时间的测量可能会导致 THz 波形因为飞秒激光系统的低频噪声而产生失真^[10]等。另外,当人们研究如物质损伤、瞬态相变、相位畸变等物理过程时,就必须依靠对超快 THz 脉冲的瞬态特性的检测^[11~13]。而实现 THz 瞬态检测的前提是快速探测太赫兹脉冲^[14]。因此,在保证信噪比的前提下,如何提高 THz 脉冲的检测速度成为扩大 THz-TDS 应用范围面临的主要问题之一。THz-TDS 技术的进一步发展亟需 THz 脉冲探测速度的进一步提高和快速、高效的数据处理方法。而解决这一问题的最有效手段之一就是研究和开发快速扫描的 THz-TDS 系统。

与传统 THz-TDS 不同,快速扫描 THz-TDS 系统不对抽运光进行调制,而是在抽运光连续照射下,结合探测光快速的时间扫描进行信号的快速采集。这种方法不需要使用锁相放大技术,而采用均值滤波等信号处理手段来提高信号的信噪比,信号采集处理的总时间主要取决于时间延迟线的扫描速度及信号的采样率和采样长度。因此,只要实现光学延迟线的快速扫描以及信号的快速采集,就能够大大缩短 THz 脉冲的探测时间。

3 国内外研究现状

光学延迟线是 THz-TDS 系统的关键部件。对于快速扫描 THz-TDS 系统而言,光学延迟线的扫描速度至关重要。目前已经有越来越多的研究小组致力于这方面的探索和尝试。

3.1 THz 单脉冲测量技术

单脉冲检测技术不需要时间延迟,只需要一个激光脉冲就能够完成对 THz 脉冲时域波形的测量,因此该技术极大地提高了 THz-TDS 测量的速度。目前已存在多种 THz 单脉冲探测技术,包括啁啾脉冲光谱编

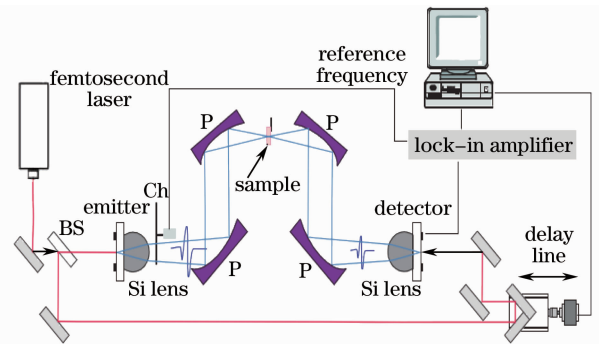


图 1 传统 THz-TDS 系统的典型装置图

Fig. 1 Sketch of conventional THz-TDS system

码方法、条纹相机法、啁啾脉冲互相关技术、同轴光谱全息恢复算法等^[15~17], 其中最具代表性的是啁啾展宽技术, 如图 2 所示。其基本原理是探测光脉冲被光栅对在时域展宽, 探测光脉冲的不同频率被 THz 脉冲不同时刻的电场所调制。利用平衡探测技术与频谱仪检测不同频率探测光的调制度, 就可以得到 THz 脉冲的时域波形。目前, 单脉冲测量技术可以实现 100 Hz 重复频率的实时显示。然而, 单脉冲测量技术需要使用激光放大器, 而且存在着时间分辨率受限的问题。同时, 测得的 THz 脉冲信号失真较严重, 而且时间窗口较短, 通常只有 10 ps 左右, 对应的频谱分辨率较低^[18,19]。

3.2 快速扫描转动光学延迟线

传统的时间延迟线由直线运动的电移台驱动反射器实现, 其扫描速度受平动物体运动惯量所限而难于提高。而利用连续转动的光学延迟装置可以方便地实现快速的时间扫描。因此, 设计采用快速转动的光学延迟装置是提高 THz 脉冲探测速度最简单实用的办法。检流计或振荡器驱动的光学延迟器^[20] 最早应用于 THz-TDS 技术, 扫描频率在 100 Hz 时能提供近百皮秒的延迟时间。

除了以转动代替平动之外, 科研工作者还在延迟线的反射镜的形状设计上加以研究, 从而研制出许多新型的转动时间延迟器。圆的渐开线是一条绕在该圆上的线段在从圆上绕开时其端点的轨迹。圆渐开线型光学延迟器具有扫描速度快、线性度高、扫描时间窗口大等优势。同时, 该延迟器会对入射光产生会聚和发散效应, 并且入射光发散角引起的光程差限制了其时间分辨率。2004 年, Xu 等^[21] 研制了圆渐开线型光学延迟器, 该装置能够实现纳秒量级的时间延迟, 其原理和样机分别如图 3、图 4 所示。图 3 中, 在圆心 O 和圆周上 A 点处各安装一面反射镜, 当处于 O 和 A 点的反射镜对绕着位于 O 点且与该圆垂直的轴旋转时, 只要入射光是沿旋转轴入射, 那么, 该光线必然由具有圆渐开线形状的反射镜反向反射回来, 而且光程的增量与旋转角成正比。

Kim 等^[22,23] 于 2007 年和 2008 年分别利用改进的两臂和六臂圆渐开线外反射面组合成反射镜进行 THz 脉冲快速扫描。如图 5 所示, 系统利用快速扫描光学延迟线取代传统的线性扫描光学延迟线, 并利用前置放大器取代锁相放大器。周期性快速扫描 THz 脉冲信号, 同时结合信号平均法消除噪声, 从而实现

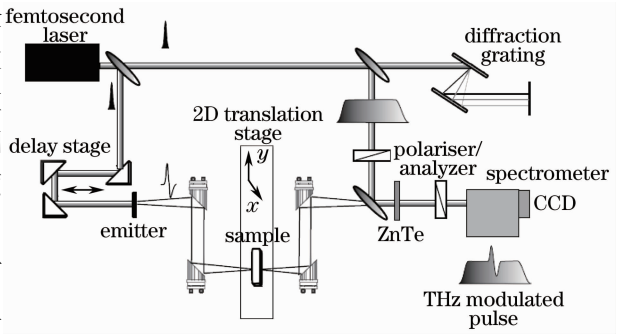


图 2 啁啾展宽测量 THz 波单脉冲的装置图^[19]

Fig. 2 Setup of a chirped-pulse detection system^[19]

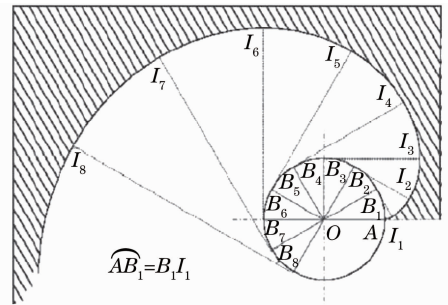


图 3 圆渐开线型光学延迟线原理图^[21]。光线沿 $OB_iI_iB_iO(i=1,2,\dots)$ 的路径入射和返回

Fig. 3 Schematic illustration of a circular involute stage^[21]. The optical beam is injected into and retroreflected by the involute reflector following the path $OB_iI_iB_iO(i=1,2,\dots)$

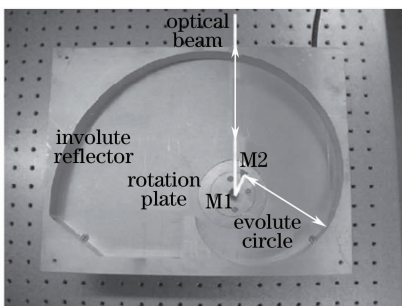


图 4 圆渐开线型光学延迟器的样机图^[21]

Fig. 4 Photo of a prototype of circular involute stage^[21]

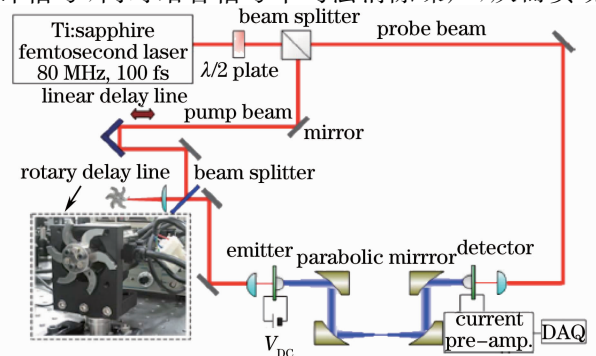


图 5 快速扫描 THz-TDS 系统装置图^[23]

Fig. 5 Experimental setup of rapid scan THz-TDS system^[23]

THz 脉冲信号的快速采集和显示。光学延迟线的扫描频率达 400 Hz,扫描延迟时间窗口达 140 ps。最近,他们为了降低反射面的加工制作成本,又以平面反射镜代替圆渐开线反射镜进行了 THz 脉冲的快速测量^[24]。

除了圆渐开线外,螺旋面亦可以被引入光学延迟线领域。螺旋面是由与旋转轴具有一定夹角的母线绕旋转轴旋转所形成的曲面。回转螺旋面反射镜延迟器具有线性度好、扫描时间长、扫描频率高等优势,但也存在着延迟光束的空间脉冲前畸变大、反射光有横向平移、光程受限于回转螺旋面的 2 倍导程等弊端。1998 年, Wang 等^[25]发明了直回转螺旋面反射镜光学延迟线,并未引入 THz-TDS 领域中。Molter 等^[26]研制了转动螺旋面反射镜进行时间延迟的快速扫描,从而实现了快速的光纤耦合 THz-TDS 系统。同时,该系统已经被应用于回旋加速器脉冲磁场共振谱的测量,如图 6 所示。图 6 中,左上部分为快速转动的时间延迟器。与一般单次反射的螺旋面延迟线不同,该器件安装了 4 片螺旋面反射镜,并与光路配合,旋转 1 次就可以实现 4 次反射,极大地提高了扫描频率。其扫描频率可达 250 Hz,扫描延迟时间窗口可达 140 ps。

3.3 异步光学采样技术

异步采样技术^[27]是一种不采用任何机械时间延迟线来实现 THz 脉冲时间取样的测量技术。这种技术采用两台重复频率具有固定差值的锁模激光器分别作为抽运光和探测光。假设在某个脉冲时抽运光和探测光的脉冲在时间上重合,由于二者的重复频率不同,则在下一脉冲时两个脉冲之间有一个时间差,以后的每个脉冲都依次增加一个时间差,直到二者再次重合为止,从而实现探测光对 THz 脉冲的时间取样测量^[28]。其原理如图 7 所示。

在光学采样技术中,扫描延迟时间等于激光器的相邻飞秒脉冲之间的时间间隔,扫描频率等于两激光器的重复频率之差。异步光学采样的优势在于无机机械延迟装置、扫谱时间快、测量精度高,能够实现纳秒量级的扫描延迟时间和千赫兹量级的扫描频率^[28],系统装置如图 8 所示。使用两台钛宝石飞秒激光器,一台为主激光,作为 THz 脉冲激发源;另一台为从激光,作为 THz 脉冲探测光,其扫描频率达 2 kHz。但这种方法需要两台飞秒激光器,系统成本高,并且需要控制两台锁模激光器的重复频率,结构庞大复杂,控制难度高。

最近, Wilk 等^[29]提出通过控制一台飞秒激光器腔长实现全光纤无机机械延迟的 THz-TDS 系统的方法,时间窗口达到了纳秒量级。如图 9 所示,该系统采用光纤飞秒激光器,激光通过光纤耦合的 50/50 分束器输出到 A、B 端口。B 端口的激光经过 80 m 长的光纤延迟线,作为 LT-InGaAs 天线的激发源;A 端口的激光作为探测光,接收器为 LT-InGaAs 探测器。THz 信号由锁

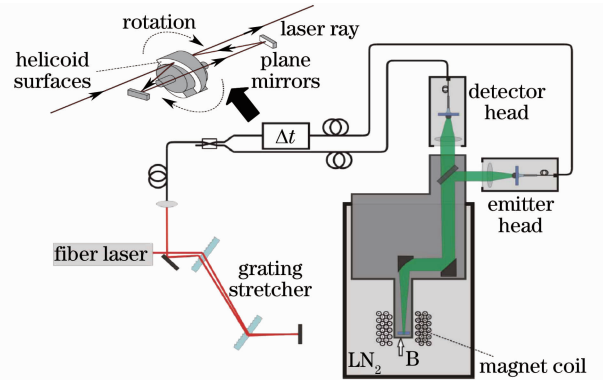


图 6 回旋加速器脉冲磁场共振的快速 THz-TDS 系统测量装置图^[26]

Fig. 6 Experimental setup of high speed THz-TDS system for cyclotron resonance in pulsed magnetic field^[26]

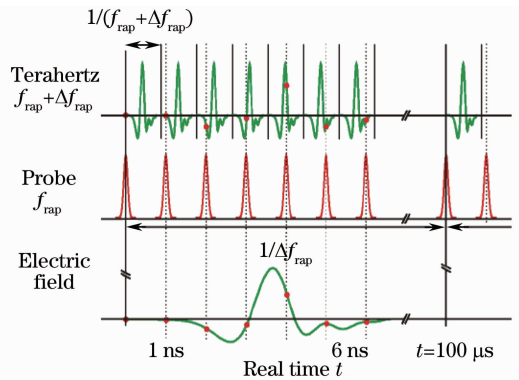


图 7 异步光学采样的原理图^[28]

Fig. 7 Sketch of the asynchronous optical sampling principle^[28]

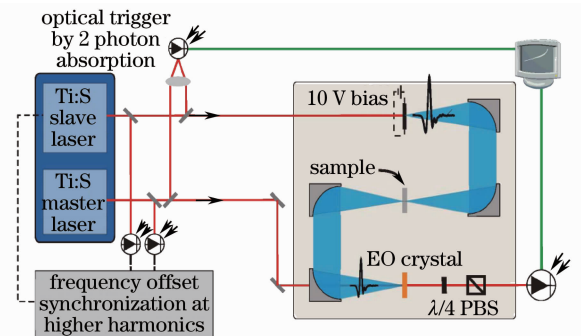


图 8 基于高速异步光学采样的 THz 光谱装置图^[28]

Fig. 8 Setup of the high-speed asynchronous optical sampling terahertz spectrometer^[28]

相放大器测得,激光的重复频率通过计数器测得。实验中,延迟线的时间窗口达到 97 ps。然而,目前这项工作仍然依赖于机械延迟平台来控制激光腔的长度。类似地,Furuya 等^[30]利用一台重复频率可调谐的飞秒激光器实现了高速 THz-TDS 系统,扫描速度达到 330 Hz,时间窗口为 160 ps。但是由于激光脉冲的定时抖动严重,导致系统的带宽仅有 0.1 THz,而且信噪比不高。

3.4 基于光纤的延迟线

为了尽可能消除实际应用中许多自由空间的不利因素,基于飞秒光纤激光器的 THz-TDS 光纤耦合系统应运而生。基于光纤的时间延迟器可以采用电控方式实现无移动元件的光学延迟,其扫描频率可以很方便地工作在千赫兹量级,而且实现的扫描窗口也非常大。但是光纤的使用会限制入射光的光强,并且会发生展宽现象。最近,Krumbholz 等^[31,32]利用光纤伸缩器作为 THz 光谱仪的光学延迟线,并研制出光纤耦合的手持式 THz 光谱仪,如图 10 所示。实验中,系统共有 3 个关键部件:小型化的飞秒光纤激光器,光纤伸缩系统和紧凑型的光纤耦合天线(THz 激发源和接收器)。激光系统内部集成散射补偿模块,工作波长为 1550 nm,输出功率为 100 mW,重复频率为 100 MHz。光纤伸缩器的时间窗口达到 200 ps。结果显示,光纤伸缩器在未来全光纤的 THz 系统中具有巨大的应用潜力。

我国关于 THz 辐射的研究起步较晚,但是国内许多高校和研究所都积极地投入到这方面的研究当中,而且已经取得了一定的成果。到目前为止,首都师范大学、天津大学、浙江大学、中国科学院物理研究所、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院上海应用物理研究所等科研单位都在积极开展 THz 技术的研究,并取得了新的进展,主要集中在 THz 源、探测技术以及应用方面^[33~38]。然而,对 THz 脉冲快速探测的研究则相对较少,极大地制约着我国 THz 技术实用化的发展。

4 讨 论

针对 THz 脉冲的快速探测,国内外的科研工作者开展了大量的工作,取得了显著的成果,同时也存在着一些问题。单脉冲测量技术可以极大地提高 THz 光谱技术的速度,但是这种技术需要激光放大器,而且时间分辨率受到啁啾展宽的限制;利用连续转动代替直线运动能够实现快速的时间扫描,但是转动装置在线性度、占空比、返回光斑稳定性及所允许的扫描长度等方面均存在不足^[39];利用异步光学采样可以实现无移动元件的光学延迟,极大地提高延迟的扫描速度并扩大扫描区间,但是系统成本昂贵,而且操作复杂、难度大;与异步光学采样相比,光纤延迟需要考虑光纤耦合和传输中的展宽、色散及损耗等因素,但是能以较低成本实现同样性能的无移动元件的光学延迟。

5 结束语

THz 波技术,尤其是 THz-TDS 技术存在广阔的应用前景,但这项技术的应用受到了 THz 脉冲采集速度的限制。随着 THz-TDS 系统的实用化研究进程,THz 脉冲的快速检测与 THz 信号的高速处理将逐渐成为该领域的一个研究重点。

当前,国内外的研究机构都在寻找快速扫描 THz-TDS 的有效途径。光纤延迟线与其他方法相比,具有

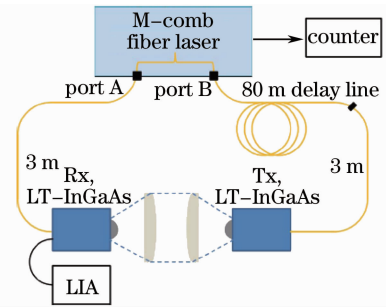


图 9 基于激光重复频率调谐的 THz 光谱装置图^[29]

Fig. 9 Experimental setup of terahertz spectrometer operation by laser repetition frequency tuning^[29]

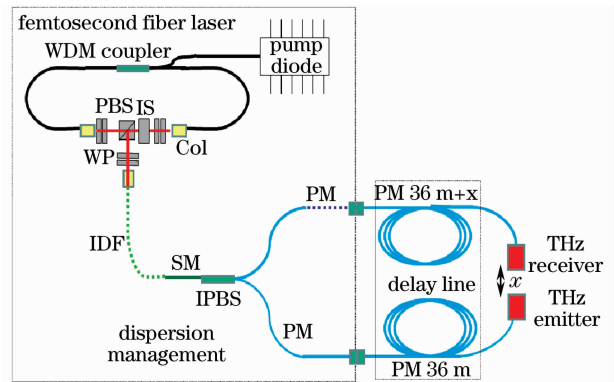


图 10 手持式 THz 光谱仪装置示意图^[32]

Fig. 10 Scheme of handheld terahertz spectrometer^[32]

扫描速度快、时间窗口大、操作方便、成本较低等优点,其实际应用前景广阔。光纤延迟虽然需要考虑光纤耦合和传输中的展宽、色散和损耗等因素,但是能以较低成本实现具有异步光学采样同样性能的无移动元件的光学延迟。因此,只要解决好光纤耦合传输中的问题,完全可以利用高性能的光纤延迟器研发出快速扫描的 THz-TDS 系统,取得 THz 技术实用化的重要突破。

参 考 文 献

- 1 X.-C. Zhang, J. Xu. Introduction to THz Wave Photonics[M]. Berlin: Springer, 2010
- 2 Peter Uhd Jepsen, David G. Cooke, Martin Koch. Terahertz spectroscopy and imaging: modern techniques and applications [J]. *Laser Photonics*, 2011, **5**(1): 124~166
- 3 M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole *et al.*. Security applications of terahertz technology [C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 44~52
- 4 Y. Chen, H. Liu, Y. Deng *et al.*. Spectroscopic characterization of explosives in the far-infrared region[C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 1~8
- 5 V. P. Wallace, A. J. Fitzgerald, E. Pickwell *et al.*. Terahertz pulsed spectroscopy of human Basal cell carcinoma[J]. *Appl. Spectrosc.*, 2006, **60**(10): 1127~1133
- 6 P. C. Ashworth, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano *et al.*. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 1244~1254
- 7 M. C. Nuss, J. Orenstein. Terahertz Time-Domain Spectroscopy[M]. In Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids. Berlin: Springer-Verlag, 1998, **74**: 7~50
- 8 M. V. Exter, C. Fattinger, D. Grischkowsky. Terahertz time domain spectroscopy of water vapor[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20): 1128~1130
- 9 Q. Wu, X.-C. Zhang. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(24): 3523~3525
- 10 H. Shimosato, T. Katashima, S. Saito *et al.*. Ultrabroadband THz spectroscopy using rapid scanning method[J]. *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2006, **3**(10): 3484~3487
- 11 K. Y. Kim, B. Yellampelle, J. H. Glowia *et al.*. Terahertz-frequency electrical conductivity measurements of ultrashort laser-ablated plasmas[C]. *SPIE*, 2006, **6261**: 62612Q
- 12 Christopher D. Stoik, Matthew J. Bohn, James L. Blackshire. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 17039~17051
- 13 K. J. Chau, K. M. Rieckmann, A. Y. Elezzabi. Metallic phase transition investigated via terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(4): 041920
- 14 S. P. Jamison, J. L. Shen, D. R. Jones *et al.*. Plasma characterization with terahertz time-domain measurements[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(7): 4334~4336
- 15 Zhiping Jiang, F. G. Sun, X.-C. Zhang. Terahertz pulse measurement with an optical streak camera[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(17): 1245~1247
- 16 Zhiping Jiang, X.-C. Zhang. Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(16): 1945~1947
- 17 B. Yellampalle, K. Y. Kim, G. Rodriguez *et al.*. Algorithm for high-resolution single-shot THz measurement using in-line spectral interferometry with chirped pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211109
- 18 X.-Y. Peng, O. Willi, M. Chen. Optimal chirped probe pulse length for terahertz pulse measurement[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(16): 12342~12349
- 19 B. Ferguson, S. Wang, D. Gray *et al.*. Terahertz imaging of biological tissue using a chirped probe pulse[C]. *SPIE*, 2001, **4591**: 172~184
- 20 Y. S. Jin, S. G. Jeon, G. J. Kim *et al.*. Fast scanning of a pulsed terahertz signal using all oscillating optical delay line [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(2): 023101
- 21 J. Z. Xu, X.-C. Zhang. Circular involute stage[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 2082~2084
- 22 G. J. Kim, S. G. Jeon, J. I. Kim *et al.*. Terahertz pulse detection using rotary optical delay line[J]. *Jan. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(11): 7332~7335
- 23 G. J. Kim, S. G. Jeon, J. I. Kim *et al.*. High speed scanning of terahertz pulse by a rotary optical delay line[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(10): 106102

- 24 Geun-Ju Kim, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim *et al.*. A novel optical delay line using a rotating planar reflector for fast measurement of a terahertz pulse[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2010, **56**(6): 1763~1766
- 25 C.-L. Wang, O.-L. Pan. Scanning Optical Delay Device Having a Helicoid Reflecting Mirror[P]. US patent, 5784186, 1998-07-21
- 26 D. Molter, F. Ellrich, T. Weinland *et al.*. High-speed terahertz time-domain spectroscopy of cyclotron resonance in pulsed magnetic field[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26163~26168
- 27 A. Bartels, R. Cema, C. Kistner. Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(3): 035107
- 28 Gregor Klatt, Raphael Gebbs, Hanjo Schäfer *et al.*. High-resolution terahertz spectrometer[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(1): 159~168
- 29 R. Wilk, T. Hochrein, M. Koch *et al.*. Terahertz spectrometer operation by laser repetition frequency tuning[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(4): 592~595
- 30 T. Furuya, K. Horita, C. T. Que *et al.*. Development of a fast scan THz-TDS system by using a repetition rate tunable femtosecond laser[C]. The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves, 2010, Mo-P. 51
- 31 N. Krumbholz, M. Schwerdtfeger, T. Hasek *et al.*. A fibers stretcher operating as an optical delay line in a fiber-coupled THz spectrometer[C]. The 33RD International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. 169~170
- 32 N. Krumbholz, C. Jansen, M. Scheller *et al.*. Handheld terahertz spectrometer for the detection of liquid explosives[C]. *SPIE*, 2009, **7485**: 748504
- 33 Li Zhongyang, Yao Jianquan, Xu Degang *et al.*. Terahertz experimental investigation of high-power tunable THz-wave parametric oscillator based upon MgO:LiNbO₃ crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0411002
李忠洋, 姚建铨, 徐德刚 等. 铌酸锂晶体中参量振荡产生高功率可调谐太赫兹波实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0411002
- 34 Li Tiejuan, Lou Caiyun, Wang Li *et al.*. Terahertz wave generation with low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 978~982
李铁元, 娄彩云, 王黎 等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 978~982
- 35 Cui Haixia, Yao Jianquan, Wang Zhuo *et al.*. Study on characteristics analysis of sum frequency generation with Fresnel phase matching used for wide tunable terahertz detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2993~3001
崔海霞, 姚建铨, 王卓 等. 用于宽调谐太赫兹探测的菲涅耳相位匹配和频特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2993~3001
- 36 Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 023001
- 37 Liangliang Zhang, Hua Zhong, Chao Deng *et al.*. Terahertz wave reference-free phase imaging for identification of explosives[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(9): 091117
- 38 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
杨昆, 赵国忠, 梁承森 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 39 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science and Technology and Its Applications[M]. Beijing: Peking University Press, 2007. 91
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. 91