

综述

太赫兹时域频谱技术研究

梁达川, 王 锴

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 太赫兹时域频谱技术(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)是近年发展起来的一项新技术,它可同时获取太赫兹脉冲与物质相互作用的电场强度和位相信息的。对被测样品的透射或反射太赫兹波信号进行傅里叶变换,能够精确地表征样品随太赫兹频率变化的光学、电学和介电特性。概述了利用光电导天线、光整流、空气等离子体等方式产生太赫兹波,以及利用光电导天线、电光取样、空气等离子体等探测太赫兹波的方法。阐述了THz-TDS系统的原理、组成和特点,以及THz-TDS技术在各领域的应用。最后对THz-TDS技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 太赫兹波;光谱分析;光电导天线;电光采样;空气等离子体

中图分类号:O441.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-04-0001-07

Research on Terahertz Time-domain Spectroscopy Technology

LIANG Da-chuan, WANG Kai

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) technology is a new developing technology in recent years, which can get electric field intensity and phase information at the same time. Consequently via Fourier transform of the input pulse and the propagated pulse, the optics, electrics and dielectric characteristics of the sample changing with terahertz frequency can be precisely characterized. The methods to generate the terahertz wave by photoconductive antennas, optical rectification and air plasmas are described and how to detect the terahertz wave by photoconductive antennas, electro-optic sampling and air plasmas are introduced. The principle, composition and characteristics of THz-TDS system are also described. Furthermore, the applications of the THz-TDS in various research fields are discussed. Finally, the development of this technology is forecasted.

Key words: terahertz wave; spectroscopic analysis; photoconductive antenna; electro-optic sampling; air plasma

太赫兹波(terahertz, THz)是频率范围为0.1~10 THz的电磁波^[1-2],对应波长从3 mm至30 μm,对应的光子能量在0.414~41.4 meV之间,其频谱位置处于微波和红外波之间,该波段近年来引起了研究者们极大的兴趣。基于其频率范围和波长量级,太赫兹波具有一些独特优势:首先,许多大分子(包括大量生物分子)的振动频率以及轻分子的转动频率都处于太赫兹波段内,太赫兹技术一方面可以研究此类物质的结构,另一方面可以利用其吸收特性进行识别检测;其次,太赫兹波的光子能量

低,仅有几个毫电子伏特,约为X射线光子能量的兆分之一,不会对人体或生物组织造成损伤;再次,太赫兹波的波长短于微波,其空间分辨率更高,在雷达测量方面优势更大;此外,太赫兹波对诸多介质材料如纸箱、塑料泡沫、衣物等具有极强的穿透能力,有利于安全检查等应用需求;最后,太赫兹作为一种宽带信息载体,其无线通讯带宽较微波获得了很大程度的提升。诸多优越特性使得太赫兹技术在科学研究、人体安检、医学诊断、危险品探测、雷达反隐、高速通信和航空航天等领域都具有重要

的应用价值,而太赫兹波段也因此吸引了国内外多领域多学科广泛而深入的关注和研究。

在太赫兹技术研究当中,太赫兹时域频谱(terahertz timedomain spectroscopy,THz-TDS)技术是目前世界范围内应用最为广泛的,它同时集成了太赫兹发射源和探测器,其工作原理是基于电场时域扫描技术,采用飞秒激光脉冲对太赫兹脉冲进行连续采样,最终得到太赫兹电场的时域信号。通过对比该太赫兹时域信号与样品和参考相互作用后的变化,利用傅里叶变换的方法,可以得到样品的光谱(透射谱或反射谱),并从中分析出样品的各项物理信息。传统的光谱方法如傅里叶变换光谱只对振幅敏感,而通过直接测量透过或从样品上反射回来的时域信号,THz-TDS技术可以同时得到样品的振幅和相位信息,从而直接从中提取出样品的吸收系数和折射率等信息。

1 THz-TDS系统中太赫兹波的产生与探测方法

THz-TDS系统中使用的是宽频脉冲太赫兹波,相应的产生和探测方法有很多,包括光电导天线^[3],光学整流^[4],切伦科夫辐射^[5]和空气等离子体四波混频^[6]等等。

1.1 太赫兹波的产生方法

1.1.1 光电导天线法

光电导天线产生和探测太赫兹脉冲,最早是由DanielGrischkowsky等人提出来的^[3]。对于太赫兹脉冲产生,常用的光电导发射天线结构如图1所示,由半导体基底上的两根平行的金属线组成。

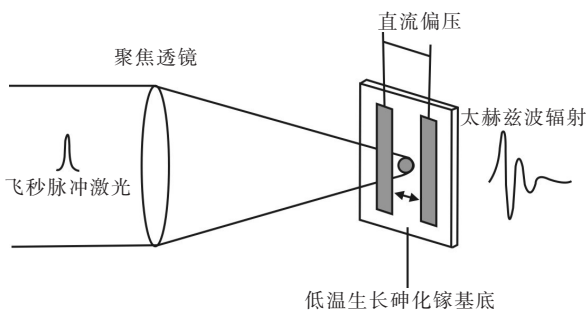


图1 光电导天线产生太赫兹波原理示意图

其产生原理为,当把一束激光聚焦到该天线之

间时,如图1中的圆点所示位置,会在该区域激发出光生载流子,当然前提为激光的光子能量大于半导体基底的禁带宽度,此时,在两条金属线之间加上直流电压,便可以驱动它们之间的光生载流子在电压下加速运动,从而辐射出太赫兹电磁波^[7]。电磁波的偏振为垂直于两条金属线的线偏振。此电磁波的频率范围与激光聚焦位置处的光致电导率随时间的变化息息相关,而该电导率的变化是由入射激光脉宽和基底的载流子寿命决定的,若要产生太赫兹波,则需要入射激光为飞秒激光,基底的载流子寿命也需要极短(约百飞秒量级)。对于中心波长在800 nm附近的飞秒激光,其对应的光电导天线基底一般为低温生长砷化镓(GaAs)或蓝宝石上硅(SOS);而对于中心波长在1 550 nm附近的飞秒激光,其对应的基底材料通常为铟镓砷(InGaAs)。这种方法产生的太赫兹时域信号脉宽通常在皮秒量级。

1.1.2 光整流法

在非线性介质中,两个单色光束发生混合,从而产生和频振荡与差频振荡现象,称为光整流效应,它是最早发现的非线性光学效应之一。

超短激光脉冲的发展为光整流效应的研究和应用开辟了新的途径。20世纪90年代初张希成等人最早提出利用非线性光学整流效应产生太赫兹相干电磁辐射脉冲^[8-9]。该方法的基本原理是利用飞秒激光脉冲在电光晶体中的二阶非线性效应,通过光学差频方法产生太赫兹波,如图2所示。

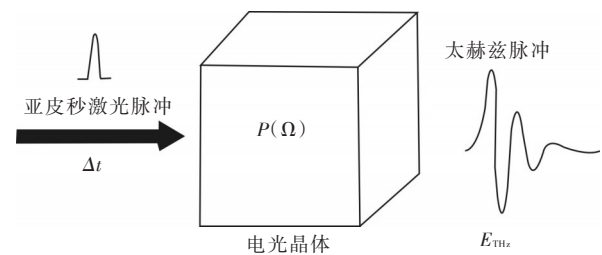


图2 光整流产生太赫兹脉冲示意图

即利用同频率的两个光子差频得到一个与光强度成正比的直流电场为

$$P(0) = \chi^{(2)}(\omega, -\omega, 0)E(\omega)E^*(-\omega) \quad (1)$$

其中, P 是电极化强度; $\chi^{(2)}$ 是二阶非线性极化率; ω 是基频。上式中的直流电场是关于飞秒激光脉冲

包络有关的时间函数,则在电光晶体中将可产生一个交变电场,从而向外辐射太赫兹波为

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial^2 P(0)(t)}{\partial t^2} = \chi^2 \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

光整流的物理过程是一个瞬间完成的过程,而产生的太赫兹辐射强度与非线性介质的极化电场强度 $P(t)$ 的低频部分对时间的二阶偏导数成正比。光整流的关键问题是位相匹配,它可以放大激光和太赫兹脉冲在非线性介质中的相互作用,并且能影响光整流的产生效果。

非线性介质的非线性系数影响所产生的太赫兹脉冲的振幅强度、频率分布以及光整流的转换效率。常用的非线性介质有铌酸锂 (LiNbO_3)、钽酸锂 (LiTaO_3)、有机晶体 DAST(4-(4-二甲基氨基苯基)甲基吡啶对甲基苯磺酸盐)、半导体砷化镓 (GaAs)、碲化锌 (ZnTe)、磷化铟 (InP)、碲化铟 (InTe) 等。在产生太赫兹脉冲方面,用得最多的是碲化锌 (ZnTe) 和砷化镓 (GaAs),而 DAST 则是很有潜力的有机介质,是目前非线性效应最强的物质之一。

1.1.3 空气等离子体法

Cook 和 Hochstrasser^[10] 等人最早发现将频率为 ω 的飞秒脉冲和频率为 2ω 的倍频光聚焦在空气中,将空气电离可产生太赫兹波。该方法与之前的在晶体中进行光整流产生太赫兹波相比,不存在损伤阈值的问题,即对激光的强度没有限制。空气中产生太赫兹波有 3 种结构,如图 3 所示。图 3a 是将波长为 800 nm 或 400 nm,脉宽为 100 fs 的激光脉冲聚焦到空气中产生等离子体,从而辐射太赫兹波;而图 3b 较之于图 3a 则是在聚焦透镜后添加了一块 BBO 晶体用于倍频;图 3c 是利用分色镜将波长为 800 nm 和 400 nm(基频波与二次谐波)的两束光混合在一起,通过干涉相长或干涉相消对太赫兹辐射进行相干控制。

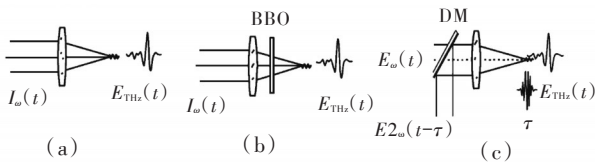


图 3 空气等离子体产生太赫兹波的三种结构示意图

张希成等人^[11]证明了空气等离子体产生太赫兹

脉冲是发生在空气中的三阶非线性效应(即在空气中发生了 $(2\omega + \Omega_{\text{THz}}) - \omega - \omega = \Omega_{\text{THz}}$ 四波混频过程),其机理可用 $E_{\text{THz}} \propto \chi^{(3)} E_{2\omega}(t) E_{\omega}^*(t) \cos(\varphi)$ 来表达,并且认为三阶极化率张量只与 χ_{xxxx} 分量有关,产生的太赫兹电场只在 x 方向有分量,是线偏振光。

之后,一些关注空气产生太赫兹脉冲的研究者在重复产生太赫兹脉冲的实验过程时,发现产生的太赫兹脉冲在两个正交的方向有几乎相等的分量,并对其做了解释和证明。2008 年, Aurelien Houard^[12] 等人提出了在空气产生太赫兹脉冲的实验过程中,由于强激光会在 BBO 晶体中发生双折射,且作者认为空气等离子体各向异性会使基频波有偏转,产生的太赫兹脉冲在与基频倍频垂直的 y 方向上也会产生较大的太赫兹分量,实际上是来自于三阶极化率张量 $\chi_{xyxx}^{(3)} + \chi_{xyyy}^{(3)}$ 项的贡献。

1.2 太赫兹波的探测方法

对于太赫兹波可利用热探测技术进行功率探测。而对于波形和频率探测,由于包括光电二极管在内的普通传感器灵敏度不够,并且太赫兹波的背景噪声较高,所以使用一般的探测器是很难直接检测到频率高于 100 GHz 以上的太赫兹波的。因此对于 THz-TDS 中的宽带脉冲太赫兹波(一般为皮秒脉冲),一般使用基于采样测量原理的探测方法进行测量,从而解决一般探测时的困难。

1.2.1 采样测量原理

采样测量法研究的对象是离散时间信号。一般离散时间信号是通过连续时间信号均匀抽样得到的。抽样运算在数学上表示为连续时间信号 $g_a(t)$ 和周期脉冲序列 $p(t)$ 的乘积,结果产生一个离散时间信号 $g_p(t)$ 如下式

$$g_p(t) = g_a(t)p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_a(t)\delta(t-nT) \quad (3)$$

针对脉冲信号的测量,可以参照数字示波器常用的采样方法实时采样和等效时间采样。实时采样是按照固定顺序进行,并且采样顺序与示波器屏幕上显示顺序相同。实时采样技术适合捕获单次的、非周期的或者频率较低的信号。但由于波的频率太高,进行实时采样存在困难,所以必须使用等效时间采样。

等效时间采样又称重复采样,用于构建重复信

号的图像。在每一个重复周期内等效之间只采集少量的信息,经过多次重复测量,原始信号的波形逐渐积累而成。即使信号的频率成分远远高于采样速率,也能形成精确地采样。换言之,等效采样就是把高频、快速信号变成低频、慢速信号来处理,用低速的系统处理高速数据。一般在重复信号的每个周期或相隔几个周期取一个样,而每个取样点分别取自每个输入信号波形不同的位置上,若干个取样点组成一个周期,可以组成类似于原信号的一个周期的波形,但是周期拉长了。

等效时间采样原理可用图4描述。

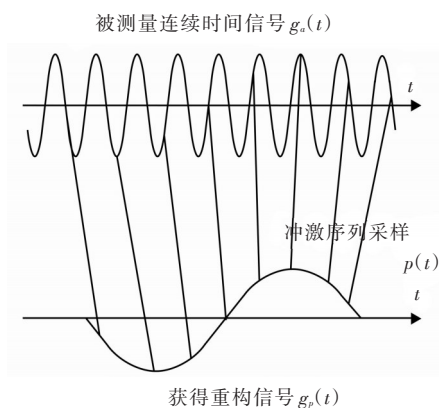


图4 等效时间采样原理

即通过在周期信号 $g_a(t)$ 的不同周期上,利用冲激序列 $p(t)$ 抽取采样点,重新构建待测信号的波形,新组成的信号 $g_r(t)$ 形状与原始信号 $g_a(t)$ 相似但在时间上比原来的信号宽展了若干倍,从而解决了皮秒量级太赫兹波脉冲探测时频率响应问题的困难。

具体的实现方法可以利用光学延迟线结构。在此结构中,采样光首先经过沿光束入射方向单向移动的反射镜,以便连续改变采样光与待测信号的相对时间延迟,实现对整个待测信号的顺序采样扫描。如图5所示。

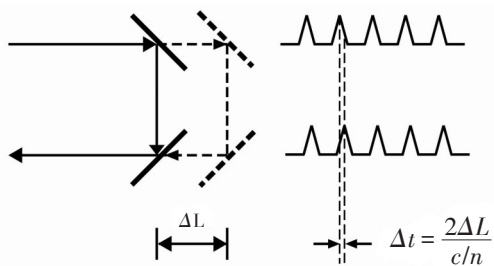


图5 光学延迟结构示意图

当反射镜位移 ΔL 时,扫描时间偏移为 $\Delta t = 2n\Delta L/c$,式中, c 为光速; n 为折射率。

时延逐渐增加的采样脉冲对被测信号进行采样,其采样点的位置是逐渐移动的,经过足够长时间的重复采样,就可以得到波形和被测信号相似、时间上大大放慢的输出波形,这也就是前面提到的采样测量法。光学延迟结构可以固定在电控平移台上,以便位移得到精确控制。

1.2.2 光电导天线测量法

基于光电导天线的太赫兹探测原理正好与产生原理相反,通常采用的探测天线结构如图6所示,也由半导体材料基底上的两条平行金属线组成,不过,较发射天线,其在中间部分多了一个结。

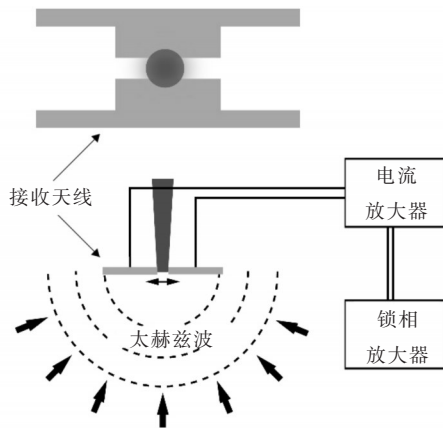


图6 光电导天线探测太赫兹波示意图

当将一束飞秒激光聚焦到该结中间时,也会激发出结位置处的光生载流子。其中,飞秒激光中心波长和基底类型的选取同1.1.1小节中的介绍一样。当太赫兹信号也入射到该结位置时,其电场将驱动结中间的光生载流子在结间运动,从而在两条金属线之间形成电流,电流的大小和方向正比于太赫兹时域电场的振幅和方向,通过测量该电流值,便可以提取入射太赫兹的电场大小^[7]。该探测天线只可探测偏振方向垂直于两条金属线的太赫兹波。由于太赫兹脉冲的时域宽度远远大于激发飞秒激光的脉宽,且半导体基底的光生载流子寿命极短,远远小于脉冲重复频率,因此在它们同时到达探测天线结的时候,实际上只有太赫兹脉冲与飞秒激光在空间上重叠的位置对电流有贡献,这时的太赫兹电场就相当于是一个直流电场。基于1.2.1节

介绍的的采样测量原理,想要得到整个太赫兹的时域信号,需要逐渐改变飞秒激光和太赫兹时域信号的光程差,让太赫兹脉冲的不同位置与飞秒激光重叠。由于基于光电导天线方法产生的太赫兹脉冲能量很低,因此它在探测天线上所能够驱动的电场也是很小的,为了能够探测出该电流信号且增加信噪比,通常需要使用电流放大器和锁相放大器的组合电路。

1.2.3 电光取样探测法

电光取样测量技术基于线性电光效应:当太赫兹脉冲通过电光晶体时,会发生电光效应,从而影响探测(取样)脉冲在晶体中的传播。当探测脉冲和太赫兹脉冲同时通过电光晶体时,太赫兹脉冲电场会导致晶体的折射率发生各向异性的改变,致使探测脉冲的偏振态发生变化。调整探测脉冲和太赫兹脉冲之间的时间延迟,检测探测光在晶体中发生的偏振变化就可以得到太赫兹脉冲电场的时域波形。

自由空间电光取样太赫兹探测原理如图7所示。

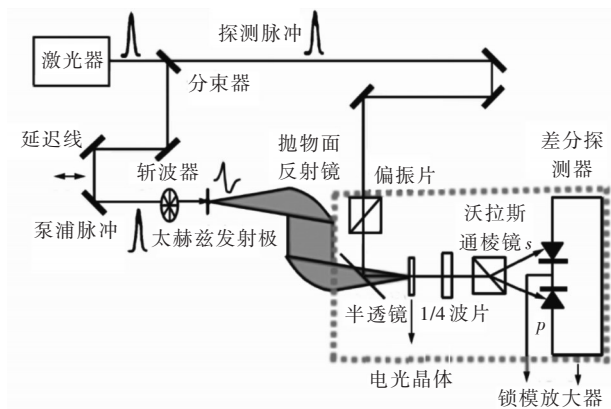


图7 电光探测示意图

图中的激光器为飞秒激光器,它所发出的飞秒激光脉冲经分束器之后,分为泵浦脉冲和探测脉冲。泵浦脉冲用来激发太赫兹发射极使其产生太赫兹脉冲,然后该脉冲被离轴抛物面镜准直聚焦,经半透镜照射到电光晶体之上,由此改变电光晶体的折射率椭圆。当线偏振的探测脉冲在晶体内与太赫兹光束共线传播时,其相位会被调制。由于电光晶体的折射率会被太赫兹脉冲电场改变,所以探测光经过电光晶体时,其偏振状态将会由线偏振转

变为椭圆偏振,再经偏振分束镜(这里常用的是沃拉斯通棱镜, Wollaston Prism)分为s偏振和p偏振两束,而这两束光的光强差则正比于太赫兹电场。使用差分探测器可以将这两束光的光强差转换为电流差,从而探测到太赫兹电场随时间变化的时域频谱。利用机械电动延迟线可以改变太赫兹脉冲和探测脉冲的时间延迟,通过扫描这个时间延迟可得到太赫兹电场的时域波形。为了提高灵敏度和压缩背景噪声,可以采用机械斩波器来调制泵浦光,而后利用锁相探测技术,即可获得太赫兹电场振幅和相位的信息。

1.2.4 空气探测法

2006年,戴建明和张希成等人^[6]根据太赫兹辐射的产生和探测为互逆过程这一理论,利用三阶非线性性质实现了空气等离子体探测太赫兹电场。图8是利用空气产生并探测太赫兹的装置图。

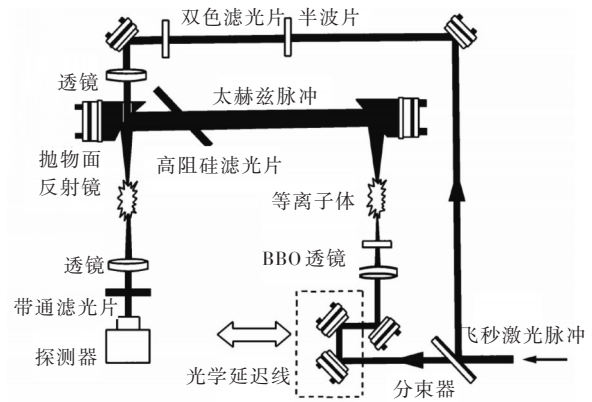


图8 空气等离子体产生与探测THz波装置示意图

在探测太赫兹辐射时,将800 nm的探测激光与太赫兹脉冲同时聚焦在空气中,在四波混频的过程中,太赫兹辐射与800 nm激光可以产生400 nm波长的光 $E_{\text{sign} a/2\omega} \propto \chi^{(3)} E_{\omega} E_{\omega} E_{\text{THz}}$,其中 $E_{\text{sign} a/2\omega}$ 是太赫兹光场诱导产生二次谐波信号的电场分量,可见二倍频光的电场强度正比于太赫兹在特定延迟时刻的电场强度。

以往,远距离宽带太赫兹波的遥感探测和光谱分析是无法实现的,这是因为空气中的水蒸气对太赫兹波具有强吸收,太赫兹波在空气中的衰减高达100 dB/km。但空气等离子体产生和探测太赫兹波的方法是通过将可见光脉冲发送到远处被测物体附近来产生和探测太赫兹波的,利用可见光在空气

中的低衰减(<0.01 dB/km)来实现远距离太赫兹波的感测,因而具有重要的应用意义。

2 THz-TDS系统结构简介

2.1 透射式 THz-TDS 系统

8-F 共焦式透射系统是最典型的一类 THz-TDS 系统,许多更高功能的系统都是基于 8-F THz-TDS 的改进型,图 9a 是其示意图。从飞秒激光器出射的飞秒激光,经过分束器后被分为两束,一束为产生光,一束为探测光,它们分别被反射镜引导,打到经

直流电压偏置的发射天线和未偏置的探测天线上,用于产生和探测太赫兹波。这里,由于光电导天线只在飞秒激光聚焦的地方对太赫兹产生和探测有作用,因此它们相当于是太赫兹波辐射的点源和点探测器,为了能较大程度上的收集太赫兹波,通常会在发射和探测天线后端加上一个半球或超半球形状的硅透镜^[3,13]。如图 9a 所示,产生的太赫兹被 4 个 90° 离轴抛物面镜组成的 8f 光路引导,最终聚焦到探测天线上。样品的测量位置处于中间两个抛物面镜之间,因为此处的太赫兹波是聚焦的状态,光斑小,且各频率的空间分布也均匀。

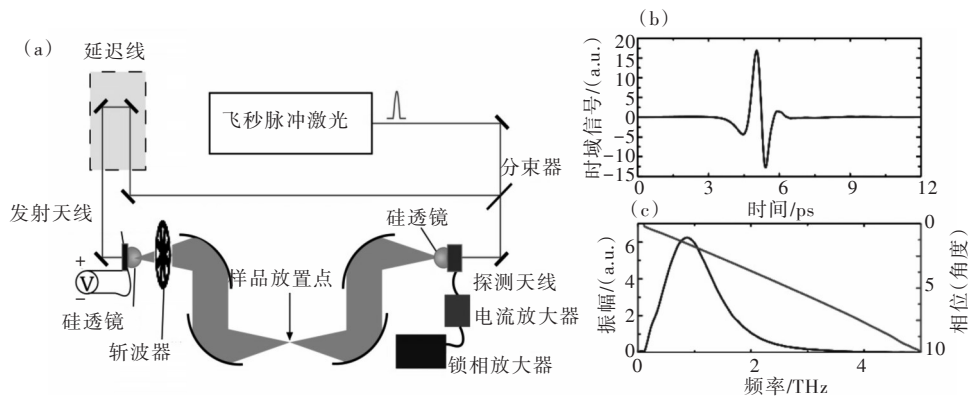


图 9 透射式 THz-TDS 系统光路和信号 (a) 基于光电导天线的透射式 THz-TDS 系统光路示意图 (b) 和 (c) 实际扫描得到的太赫兹时域脉冲信号和其对应的傅立叶变换振幅和相位谱线

图中,探测光路内的光学延迟线的作用是为了改变太赫兹脉冲和飞秒激光脉冲在探测天线上的重叠位置,从而采样扫描出整个太赫兹时域脉冲信号;斩波器、电流放大器和锁相放大器的作用是为了提取太赫兹电场在探测天线上驱动电流的大小和方向,并同时提高信噪比。图 9b 和图 9c 分别给出了一套基于光电导天线搭建的 8f 共焦 THz-TDS 系统的时域信号及其对应的傅里叶变换频谱振幅和相位信号,可见,该系统的有效带宽覆盖了 $0.1\sim 3.5$ 太赫兹,振幅信噪比高于 $5\,000:1$ 。

同样的时域探测技术,也广泛应用于上文中提到的其他太赫兹产生和探测方法,甚至可将各种方法混合使用,以满足自身的测量需要。

2.2 反射式 THz-TDS 系统

透射式 THz-TDS 系统不能覆盖所有的应用场景,为实现太赫兹波反射光谱的测量,可靠的反射式 THz-TDS 系统是不可缺少的。图 10 是一套反射

式 THz-TDS 系统示意图。

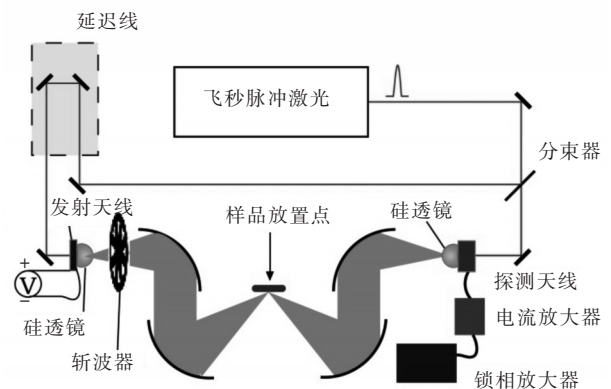


图 10 反射式 THz-TDS 系统光路示意图

其结构与 8-F 共焦式透射系统类似,其中主要区别在于传输部分结构的不同,反射式中使用了两个 60° 角的离轴抛物面反射镜,代替了透射式中两个 90° 角的离轴抛物面反射镜,探测时需要靠样品的表面在样品点对波进行反射,才能将波传送至探测器完成探测,因此反射式系统对样品摆放的位置

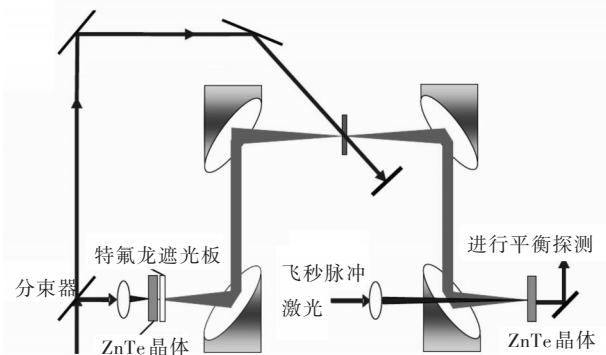
及方向有着更严格的要求。此外与透射式系统相同,为了满足采样测量的需要,在激发光路中加入光学延迟线,最后通过电流放大器与锁相放大器进行太赫兹脉冲的测量。

2.3 光泵浦等扩展式 THz-TDS 系统

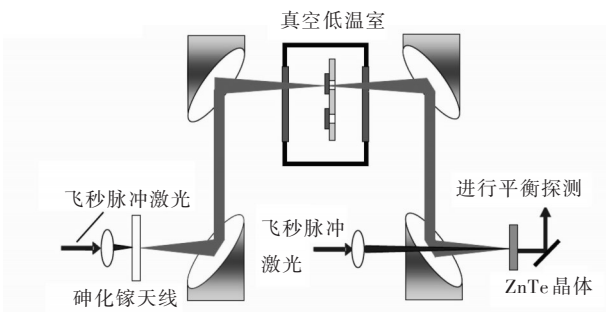
为了满足测量需要,许多课题组和商家开始对 THz-TDS 系统进行拓展,引入其他技术,如光控、温控、磁控和电控技术,用以研究更复杂条件下材料的性质和器件的性能等,这更加拓展了 THz-TDS 技术的应用范围^[14-15]。

系统拓展模块主要在样品测量区域加入,例如如图 11a 所示,此光泵-太赫兹探测时域频谱系统的产生和探测部分均采用 ZnTe 晶体。相对于标准的 8-F 共焦太赫兹时域频谱系统来说,要增加一个分束器和延时线。由再生放大钛宝石飞秒放大器产生波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、能量为 3.2 mJ、脉冲宽度为 50 fs 的超短激光脉冲。飞秒光脉冲经过分束器分成两束,一束用作太赫兹的产生和探测,另一束用作激发样品的泵浦脉冲。此系统可以实现材料与飞秒激光相互作用下的太赫兹频谱研究。

图 11b 展示了一种 77 K 低温 THz-TDS 系统。



(a) 光泵浦 THz-TDS 系统示意图



(b) 低温 THz-TDS 系统示意图

图 11 THz-TDS 系统的拓展

其中超快太赫兹脉冲的产生和探测分别采用宽带光导开关发射器和基于电光效应的 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ZnTe 晶体。由钛宝石自锁模激光器产生的波长为 800 nm、25 fs 的超短激光脉冲作为激励源。其中低温部分包括真空室、测试用支架、温度显示及控制器。真空室前后部分是两个硅片窗,在保持密封的同时使太赫兹波能够透过;测试用支架包括两个一模一样的孔以方便附上样品和参考基底。该系统可以实现真空超低温环境下物质的太赫兹特性测量。此外,在真空低温环境的基础上,可以外加强磁场,研究磁场环境下物质的太赫兹特性。

3 总结与展望

随着飞秒激光技术和光刻技术的发展,THz-TDS 技术日趋成熟,并逐渐趋于商业化。目前,在国际国内范围已有多家公司开始生产商用和科研用的 THz-TDS 系统,如美国的 PicoMetrix 和 Zomega 公司,德国的 MenloSystem 公司和 Protemics 公司,日本的 Advantest 公司,以及中国大恒光电公司等。进一步促进了其优秀特性广泛应用于诸如毒品药品检测、爆炸物检测、信件检测、超材料研究、太赫兹雷达、太赫兹成像与近场成像等诸多领域。综上,THz-TDS 技术应用前景十分广大,其模块化、标准化技术也日渐成熟,是太赫兹研究领域的关键技术,正处于快速发展之中。可以预见在不久的将来,太赫兹时域频谱技术将给工农业生产、国家安全和人民生活等各方面带来深远的影响。

参考文献

- [1] SIRTORI C. Bridge for the Terahertz Gap [J]. Nature, 2002, 417(6885): 132-3.
- [2] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展 [J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [3] GRISCHKOWSKY D, KEIDING S, EXTER M V, et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(10): 2006-15.
- [4] NAHATA A, WELING A S, HEINZ T F. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(16): 2321-3.

(下转第 67 页)

控制以及工程领域有着广泛的应用。例如,利用 Duffing 振子的随机共振效应进行微弱信号的检测;利用 Duffing 型电路系统对初值的敏感性进行保密通讯等。因此,研究 Duffing 型电路的非线性特性有着重要的理论意义和实用价值。进一步利用 Duffing 型电路进行信号的有效传输方案的设计与仿真实现将是我们下一步的工作。

参考文献

- [1] Kyprianidis I M, Volos C K, Stouboulos I N, et al. Dynamics of two resistively coupled Duffing type electrical oscillators[J]. *J Bifurcat Chaos*, 2006, 16(6): 1765-1775.
 - [2] Kocarev L, Parlitz U. General approach for chaotic synchronization with applications to communication[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(25):5028-5031.
 - [3] Chedjou J C, Fotsin H B, Wofo P, et al. Analog simulation of the dynamics of a van der Pol oscillator coupled to a Duffing oscillator[J]. *IEEE Trans Circ Syst-I*, 2001, 48(6):748-757.
 - [4] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic system [J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 64(8):821-824.
 - [5] Kyprianidis I M, Stouboulos I N. Synchronization of two resistively coupled non-autonomous and hyper-chaotic oscillators[J]. *Chaos Solitons Fract*, 2003, 17(2-3): 317-325.
 - [6] Zambrano S, Allaria E, Brugioni S, et al. Numerical and experimental exploration of phase control of chaos[J]. *Chaos*, 2006, 16(1):013111-9.
 - [7] Murali K, Lakshmanan M. Drive-response scenario of chaos synchronization in identical nonlinear system[J]. *Phys Rev E*, 1994, 49(6):4882-4885.
 - [8] Stavrinos S G, Deliolanis N C, Miliou A N, et al. Internal crisis in a second order nonlinear non-autonomous electronic oscillator[J]. *Chaos Solitons Fract*, 2008, 36(4): 1055-1061.
 - [9] Miliou A N, Antoniadis I P, Stavrinos S G, et al. Secure communication by chaotic synchronization: Robustness under noisy conditions[J]. *Nonlinear Anal: Real World Appl*, 2007, 8(3):1003-1012.
 - [10] Cuomo K M, Oppenheim A V. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(1): 65-68.
 - [11] Wembe E T, Yamapi R. Chaos synchronization of resistively coupled Duffing systems: numerical and experimental investigations[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, 2009, 14(4):1439-1453.
 - [12] Kyprianidis I M, Volos C K, Stavrinos S G, et al. Master-Slave double-scroll circuit incomplete synchronization[J]. *J Eng Sci Tech Rev*, 2010, 3(1):41-45.
 - [13] Volos C K, Kyprianidis I M, Stouboulos I N. Synchronization of two mutually coupled Duffing-type circuits[J]. *J Circ Syst Sign Proc*, 2007, 1(3):274-281.
-
- (上接第7页)
- [5] HEBLING J, YEH K-L, HOFFMANN M C, et al. Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities [J]. *JOSA B*, 2008, 25(7): B6-B19.
 - [6] DAI J, XIE X, ZHANG X C. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(10): 103903.
 - [7] TANI M, HERRMANN M, KONO S, et al. Generation and detection of terahertz pulsed radiation with photoconductive antennas and their application to imaging[J]. *Proceedings of the International Topical Meeting on Microwave Photonics*, F, 2009.
 - [8] 许景周. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京:北京大学出版社, 2007.
 - [9] XU L, ZHANG X C, AUSTON D H. Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in electro-optic materials [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(15): 1784-6.
 - [10] COOK D J, HOCHSTRASSER R M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(16): 1210-2.
 - [11] XIE X, DAI J, ZHANG X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(7): 075005.
 - [12] HOUARD A, LIU Y, PRADE B, et al. Polarization analysis of terahertz radiation generated by four-wave mixing in air [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1195-7.
 - [13] ZHANG W. Resonant terahertz transmission in plasmonic arrays of subwavelength holes [J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2011, 43(1): 1-18.
 - [14] 田震. 太赫兹波段表面等离子激元波的主动控制和传感应用 [D]. 天津:天津大学, 2010.
 - [15] 谷建强. 太赫兹奇异介质研究 [D]. 天津:天津大学, 2010.