

# 太赫兹技术及其应用研究进展

蔡 禾, 郭雪娇, 和 挺, 潘 锐, 熊 伟, 沈京玲

(首都师范大学 物理系, 北京市 THz 波谱与成像重点实验室,  
THz 光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要:**概述了利用光整流、光电导天线、参量振荡、空气等离子体等方式产生太赫兹(THz)波,以及利用电光取样、光电导天线、空气等离子体等探测 THz 波的方法。阐述了 THz 时域光谱技术以及近年来发展的异步电光取样技术。讨论了 THz 技术在各领域的应用。重点介绍了本课题组近年来致力于 THz 检测技术在毒品检测识别方面的研究情况。建立了含有 38 种纯度在 90% 以上的 THz 毒品谱库,并采用人工神经网络、支持向量机等方法对毒品进行计算机自动识别,研究确定了毒品纯度和有效成分含量的理论和实验方法。用高斯软件对个别品种,如甲基苯丙氨(MA)、氯氨酮、海洛因进行了光谱解析,研究结果为实现毒品的实验室检测提供了依据。最后,简单综述了 THz 技术的发展前景。

**关键词:**THz 波;无损检测;光谱分析;异步电光取样;综述

**中图分类号:**O441; TN209 **文献标识码:**A

## Terahertz wave and its new applications

CAI He, GUO Xue-jiao, HE Ting, PAN Rui, XIONG Wei, SHEN Jing-ling

(*Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging,  
Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education,  
Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

**Abstract:** The methods to generate the terahertz wave by optical rectification, photoconductive antennas, air plasmas and parametric generators are described in detail, then how to detect the terahertz wave by electro-optic sampling, photoconductive antennas and air plasmas are introduced as well. The terahertz time-domain spectroscopy and the asynchronous electro-optic sampling technique are also described. Furthermore, the applications of the terahertz technology to research fields, especially to the detection and identification of drugs are discussed. A terahertz spectrum database includes 38 kinds of drugs with a purity more than 99% is established. Moreover, the Artificial Neural Network(ANN) and a support vector machine are used to identify

收稿日期:2010-01-11;修订日期:2010-03-13

基金项目:北京市教委资助项目(No. KM200910028005);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No. 2007CB310408;No. 2006CB302901)

drugs automatically and the experimental methods and related theory are proposed to determine the purity and effective ingredients of drugs. By using a Gaussian software, individual species of drugs such as methyl-phenyl ammonia(MA), ketamine and heroin are conducted by spectral analysis, which provides a basis for implementing the drug inspection in laboratories. Finally, this paper reviews the developments of the terahertz technology briefly.

**Key words:** terahertz wave; generation; detection; air plasma; asynchronous electro-optic sampling; inspection of drugs

## 1 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波(或称太赫兹辐射、T-射线、亚毫米波、远红外,通常简称为THz)指的是频率在 $0.1 \sim 10$  THz( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ )的电磁辐射。从频率上看,该波段位于毫米波和红外线之间,属于远红外波段;从能量辐射上看,其大小在电子和光子之间。在电磁频谱上,THz波段两侧的红外和微波技术已经非常成熟,但是THz技术还很不完善。究其缘由是因为此频段既不完全适合用光学理论来处理,也不完全适合用微波理论来研究,从而形成了通常所说的“THz空隙”(THz Gap)。

20世纪80年代初,由于缺乏有效的THz产生方法和检测手段,对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限。近十几年来,超快激光技术的迅速发展为THz脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使THz辐射的产生和应用得到了蓬勃发展。

THz科学的早期研究主要集中在发展THz技术本身,之后人们开始对THz波与物质的相互作用产生兴趣,其研究对象集中在半导体,涉及超导体和介电物质,再以后,THz辐射被用来研究化学和生物样品的光谱特性。进入21世纪后,THz技术不但在基础科研中继续受到重视,其应用研究也引起人们的兴趣,比如安全检查、无损检测、医疗诊断及制药等化学合成过程中的应用等。本文前半部分介绍了THz的产生和探测方法以及THz时域光谱和异步电光取样技术;后半部分主要介绍了THz近些年比较新的应用。

## 2 THz 波的产生和探测

THz波的产生分为连续波的THz产生和THz脉冲的产生。产生连续THz波的方法主要有4种:(1)通过FTIR(Fourier Transform Infrared Spectrometer)使用热辐射源产生,如汞灯和SiC棒;(2)是通过非线性光混频产生;(3)是通过电子振荡辐射产生,如反波管、耿式振荡器及肖特基二极管产生;(4)是通过气体激光器、半导体激光器、自由电子激光器等THz激光器直接产生。

目前产生THz脉冲常用的方法有光导天线法、光整流法、THz参量振荡器法、空气等离子体法等,其中空气等离子体能产生相对较高强度的THz波而备受关注,此外,还可以用半导体表面产生THz波。下面主要介绍产生THz脉冲的一些常用方法。

### 2.1 光导天线(PCA)产生THz脉冲

光导天线辐射机制是利用超快激光脉冲泵浦光导材料,在其内部产生电子空穴对,这些载流子在外加偏置电场作用下,做加速运动形成瞬态光电流,从而辐射出低频THz脉冲。PCA由两个距离在 $\mu\text{m}$ 量级电极组成,此种THz辐射系统的性能取决于3个因素:光导体、天线的几何结构和泵浦激光的脉冲宽度,如图1所示。光导体是产生THz辐射的关键部件,对于性能良好的光导体来说,它应该具有载流子寿命极短,载流子迁移率高和介质耐击穿强度大等特点。目前应用于THz技术中最多的光导体材料是Si和低温生长的GaAs(LT-GaAs)材料。

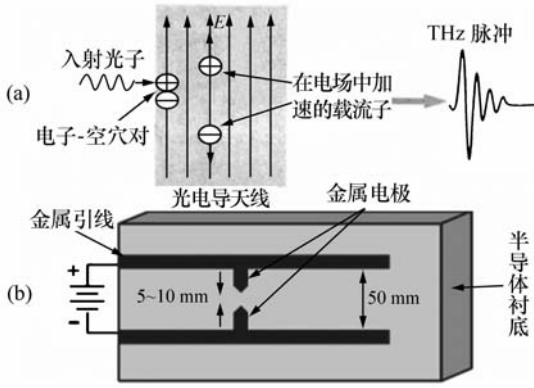


图1 光电导天线图

Fig. 1 Schematic diagram of photoconductive antenna

2.2 光整流产生 THz 脉冲

光整流方法是利用电光晶体作为非线性介质,使超快激光通过非线性节点材料进行二阶非线性光学过程或高阶非线性光学过程产生 THz 脉冲。光整流的物理过程是一个瞬间完成的过程,而产生的 THz 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 THz 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 THz 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  $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、有机晶体 DAST、半导体 GaAs、ZnTe、InP、InTe 等。在产生 THz 脉冲方面,用得最多的是 ZnTe 和 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。

比较光整流和 PCA 产生的 THz 脉冲<sup>[1]</sup>可知:(1)用 PCA 辐射的 THz 脉冲能量通常要比用光整流效应所产生的 THz 脉冲的能量强。这是因为光整流效应产生的 THz 脉冲的能量仅仅来源于入射的激光脉冲的能量,而 PCA 辐射的 THz 脉冲的能量则主要来自天线上所加的偏置电场,如果要想获得能量较强的 THz 脉冲,则可以通过调节外加电场的大小来实现。(2)PCA 产生的 THz 电磁波的频率较低,而光整流产生的 THz 电磁波的频率较高。(3)PCA 产生的 THz 脉冲频谱

宽度较窄,而光整流产生的 THz 脉冲的频谱宽度较宽。

2.3 空气等离子体产生 THz 脉冲

Cook 和 Hochstrasser<sup>[2]</sup> 等人最早发现将频率为  $\omega$  的飞秒脉冲和频率为  $2\omega$  的倍频光聚焦在空气中,将空气电离可产生 THz 波。该方法与之前的在晶体中进行光整流产生 THz 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 THz 波有 3 种结构,如图 2 所示。图(a)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 THz 波;而图(b)较之于图(a)则是在聚焦透镜后添加了一块 BBO 晶体用于倍频;图(c)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 THz 辐射进行相干控制。

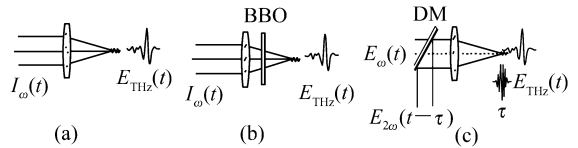


图2 空气产生 THz 结构图

Fig. 2 Terahertz pulse generated in air plasma

张希成等人<sup>[3]</sup>证明了空气等离子体产生 THz 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  $\chi_{xxxx}$  分量有关,产生的 THz 电场只在 x 方向有分量,为线偏振光。

之后,一些关注空气产生 THz 脉冲的研究者重复了产生 THz 脉冲的实验过程时,发现产生的 THz 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 6 月, Aurélien Houard<sup>[4]</sup> 等人提出了在空气产生 THz 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 THz 脉冲在与基频倍频垂直的 y 方向上也会产生较大的 THz 分量,实际上是来自于三阶极化率张量  $\chi_{xyx}^{(3)} + \chi_{xyx}^{(3)}$  项的贡献。

## 2.4 参量振荡器产生频率可调的 THz 波

光学参量振荡是产生 THz 辐射的另一机制,是基于光学参量效应的一种技术。THz 参量源通常有 THz 参量发生器(Terahertz-wave Parametric Generator, TPG)和 THz 参量振荡器(Terahertz-wave Parametric Oscillator, TPO)两种,二者之间的区别在于 TPO 有谐振腔,而 TPG 没有这样的选频结构。THz 参量源具有很高的非线性转换效率,其结构简单、易于小型化、工作可靠、便于操作、相干性好,并且能够实现单频、宽带、可调谐、可在室温下稳定运转的全固态 THz 辐射源。

THz 参量源是利用晶格或分子本身的共振频率来实现 THz 波的参量振荡和放大的,是一种与极化声子相关的光学参量技术。当一束强激光束通过非线性晶体时,光子和声子的横波场会发生耦合,产生出光-声混态,称之为极化声子。由极化声子的有效参量散射,即受激极化声子散射,可辐射出 THz 波。在这个散射过程中同时包括二阶和三阶非线性过程,因此,泵浦光、闲频光和极化波(THz 波)三者之间会发生很强的相互作用。

2008 年, Koji Suizu<sup>[5]</sup>等人利用 KTP-OPO(双波长输出 KTP 光学参量振荡器)产生的两束波长

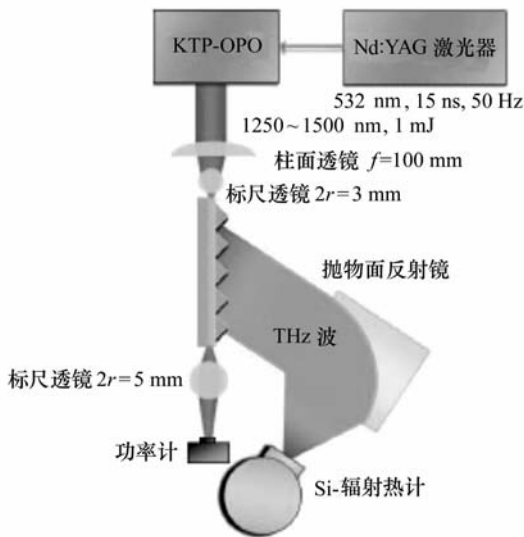


图3 参量振荡产生频率可调的 THz 波装置图

Fig. 3 Frequency-tunable THz wave generated by parametric generator

相差不大的平行泵浦光在铌酸锂晶体中差频产生出 THz 波,在 THz 波的输出上利用了切伦科夫辐射的原理<sup>[6]</sup>,如图3所示。众所周知,当晶体中极化波的速度大于辐射出的射线波的速度时就可以说其满足了切伦科夫的相位匹配条件。在铌酸锂晶体中,由两束泵浦光差频产生的 THz 波的波速(发出的瞬间具有泵浦光的速度)大于由 THz 引起的介质极化产生的次波辐射的波速(等于 THz 的速度),满足了切伦科夫辐射的相位匹配条件<sup>[7]</sup>,从而以一定角度辐射出 THz 波。同时,因为聚乙烯膜很薄,可以和 THz 波的波长相比,所以可在聚乙烯膜上使用一组硅棱镜阵列来耦合 THz 波的输出,然后用硅测辐射热计来探测产生的连续宽频范围的 THz 波。

## 2.5 几种发射源的比较

目前,THz 波发射源可以大致分为以下几类:非相干的热辐射源,电子学的高频微波辐射源,THz 激光器,光电子辐射源,这些 THz 波光源都有自己的特点及局限性<sup>[8]</sup>。自由电子激光和气体激光可以发射相对较强的 THz 辐射,并可以覆盖较宽的频率范围,但它们的体积较大,功耗较高;量子级联激光器可以输出 10 mW 数量级的 THz 辐射,但它需要工作在低温环境下,而且目前的量子级联激光器只能工作在 THz 的高频波段,第一台工作在 THz 波段的量子级联激光器的标准发射波长为 4.4 THz<sup>[9]</sup>。电子学方法可以获得较高的输出功率,但只能发射低频 THz 波。脉冲的 THz 发射源几乎覆盖了整个 THz 波段,且常温下可获得较高的信噪比,然而需要昂贵的飞秒脉冲激光器,且平均功率较低。

## 2.6 PCA 探测

利用 PCA 探测 THz 脉冲的装置与发射装置相似,只是在探测装置的天线电极之间没有施加偏置电压,而是直接连接一个电流计测量由 THz 电场驱动的自由载流子使该区域成为导体,而 THz 电场则驱动光生载流子形成电流。由于探测光脉冲和 THz 脉冲具有固定的时间关系,并假定由探测脉冲激发的自由载流子寿命远短于 THz 脉冲的周期,可近似地认为有该探测脉冲激发的

载流子会受到一个恒定电场的作用,从而产生可以测量的电流,该电流可以表示为  $\bar{J} = \bar{N}e\mu E(\tau)$ , 其中  $\bar{N}$  是光生自由电子的密度,  $\tau$  是探测脉冲和 THz 脉冲之间的时间差。该式表明了测量电流值  $\bar{J}$  正比于该时刻 THz 脉冲的电场强度,通过改变  $\tau$  探测脉冲就会对 THz 脉冲的电场进行取样。

## 2.7 电光取样

电光取样测量技术基于线性电光效应:当 THz 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 THz 脉冲同时通过电光晶体时,THz 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 THz 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 THz 脉冲电场的时域波形。

自由空间电光取样 THz 探测原理如图 4 所示。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 THz 发射极使其产生 THz 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 THz 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 THz 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(Wollaston)棱镜)分为 s 偏振和 p 偏振两束,而这两束光的光强差则正比于 THz 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 THz 电场随时间变化的时域光谱。利用机械电动延迟线可以改变 THz 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 THz 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 THz 电场振幅和相位的信息。

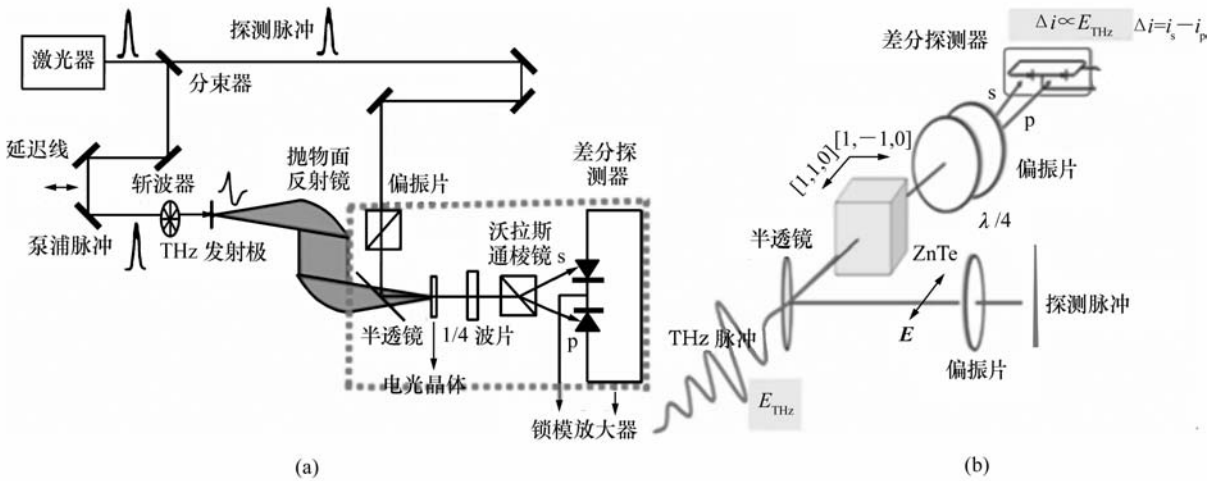


图4 电光探测原理图

Fig. 4 Schematic diagram of electro-optic sampling

## 2.8 空气探测

2006年,戴建明和张希成等人<sup>[10]</sup>根据THz辐射的产生和探测是互逆过程这一理论,利用三阶非线性性质实现了空气等离子体探测THz电场。图5是利用空气产生并探测THz的装置图。在探测THz辐射时,将800nm的探测激光与THz脉冲同时聚焦在空气中,在四波混频的过程中,

THz辐射与800nm激光可以产生400nm波长的光  $E_{\text{signal } 2\omega} \propto \chi^{(3)} E_{\omega} E_{\omega} E_{\text{THz}}$ , 其中  $E_{\text{signal } 2\omega}$  是THz波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THz在特定延迟时刻的电场强度。

以往,远距离宽带THz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

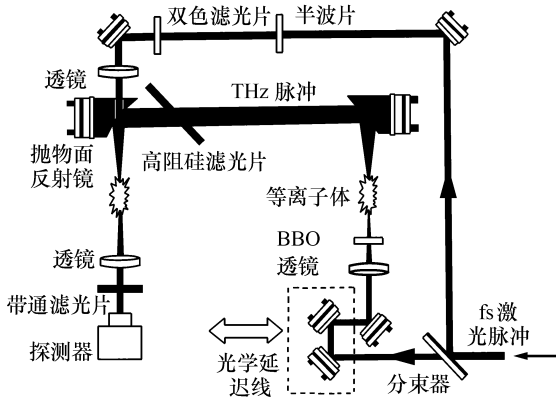


图5 空气等离子体产生与探测装置图

Fig. 5 Generation and detection of THz in air plasma

THz 波具有强吸收, THz 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 THz 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 THz 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 THz 波的感测, 因而具有重要的应用意义。

### 2.9 几种 THz 探测器的比较

THz 波的探测器可以分为: 光学和光电子学探测器(光电导天线和电光取样)和量热式探测器。光学和电子学探测器应用在脉冲 THz 技术中, 可以摒除环境噪声的影响, 获得高信噪比的测量结果, 而且可以进行相干测量; 量热式探测器可以探测各种光源发射的 THz 辐射, 而且可以测量各种光谱范围的辐射; 但是与差分测量相比, 他们的探测灵敏度较低, 而且容易受到环境辐射的影响, 是非相干测量。

## 3 THz 时域光谱技术

### 3.1 THz 时域光谱系统

利用 THz 脉冲可以分析材料的性质, 其中 THz 时域光谱技术 (THz-TDS) 是一种非常有效的测量手段。THz 时域光谱技术是一种相干探测技术, 它利用样品的 THz 透射或反射光谱信息, 同时获得 THz 脉冲的振幅信息和相位信息, 再通过时域波形进行傅里叶变换直接得到样品的吸收系数和折射率等光学参数。图 6 为 THz 时域光谱系统光路图。

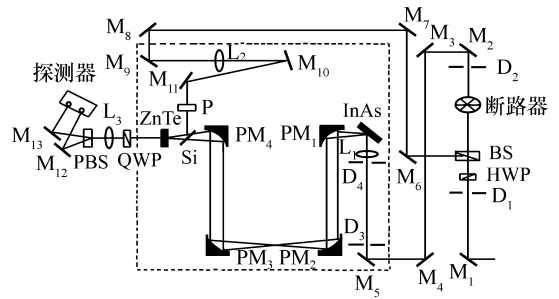


图6 THz 时域光谱系统

Fig. 6 Terahertz time domain spectroscopy

从激光器射出的飞秒激光经过分束镜分为两束, 一束为泵浦光入射到发射极 InAs, 通过光整流效应产生 THz 波, 经 4 个离轴抛物面镜聚焦到探测晶体 ZnTe; 反射的一束经一系列的反射镜到达探测晶体上 THz 的聚焦点, THz 辐射电场使通过电光探测晶体的探测脉冲的偏振态发生改变, 从而反映出 THz 电场的大小及变化。通过电动平移台的移动改变探测点, 从而描画出 THz 波的时域波形。

### 3.2 异步电光取样技术

传统的 THz 时域光谱系统采用了电光取样的方法, 系统中扫描 THz 谱需用电动平移台, 通过电动平移台调整探测脉冲与 THz 的相位差来改变测量点, 该方法扫谱时间慢, 测量时间长。

近年来, 出现了一种基于异步电光取样技术的测谱系统<sup>[11,12]</sup>, 其特点是无机械延迟装置、扫谱时间快、测量精度高。

该系统由 1 台 60 fs 的钛宝石激光器作为探测光, 1 台 10 fs 的钛宝石的激光器作为泵浦光, 2 台激光器的重复频率均约为 82.6 MHz, 通过激光控制电路来控制 2 台激光器的重复频率有一个微小的差值, 保持在 108 Hz。如图 7 所示, 非线性晶体、光电倍增管和电流前向放大器组成了和频振荡自相关仪, 产生时间触发信号输入示波器作为时钟信号。产生 THz 和探测 THz 均采用了 PCA 结构。由于探测脉冲的周期和产生的 THz 脉冲周期不同, 每经过一个重复周期, 探测脉冲的探测点相对与 THz 波向前移动, 从而实现探测点的改变, 描画出 THz 的时域波形, 其原理如图 8 所示。

采用这种方法对 THz 波进行采样可实现 1 s

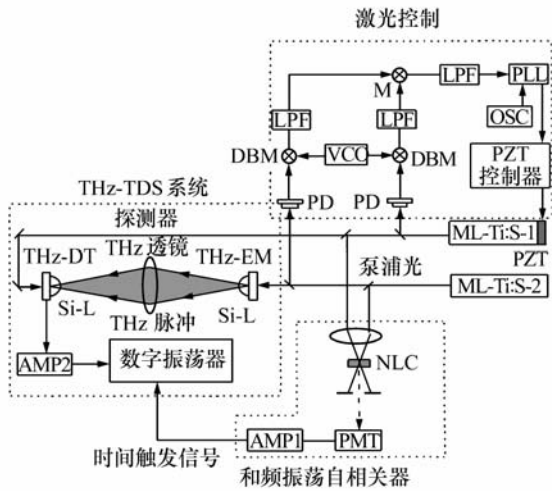


图7 异步电光取样装置图

Fig.7 Asynchronous optical sampling setup

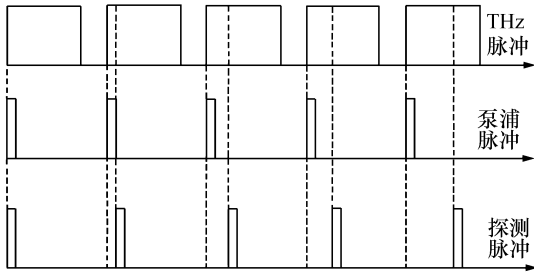


图8 异步电光取样探测原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of asynchronous optical sampling

采108次THz谱,频谱宽度为63.7 THz,时间分辨率可达15.8 fs。相比传统的用平移台扫谱的方法,该方法具有速度快、频谱宽度宽、频率分辨率高等特点,且这种异步电光取样系统的技术指标正在不断的提高。该技术对未来THz的实际应用提供了效率保障。

## 4 THz 波技术的应用

### 4.1 THz 是对毒品检测的有效手段

近年来,作者致力于THz检测技术在毒品识别方面的研究,并取得了一些成果,为实现毒品的实验室检测提供了依据。

利用THz时域光谱技术测量得到了38种纯

度在90%以上的毒品的THz光谱,建立并丰富了毒品THz光谱数据库<sup>[13]</sup>;在初步研究了“自然毒品”的光谱特征和对隐藏毒品利用特征峰识别、成像识别等方法<sup>[14]</sup>进行识别的基础上,研究利用神经网络<sup>[15]</sup>、支持向量机(SVM)<sup>[16]</sup>,二次求导等方法<sup>[17]</sup>实现计算机自动识别研究。神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是由大量处理单元(神经元)相互连接而成的网络,它模拟生物体中神经网络的某些结构和功能,如学习、控制和识别等,采用物理上可实现的器件或采用计算机来模拟生物体中神经网络的某些结构和功能,是人工智能研究的一种方法。其中自组织特征映射(Self Organization Feature Mapping, SOM)神经网络是基于无监督学习方法神经网络的一种重要类型。采用THz-TDS技术对6种常见毒品进行研究,得到了0.2~2.6 THz的特征吸收光谱,将毒品的60个光谱作为训练数据输入SOM

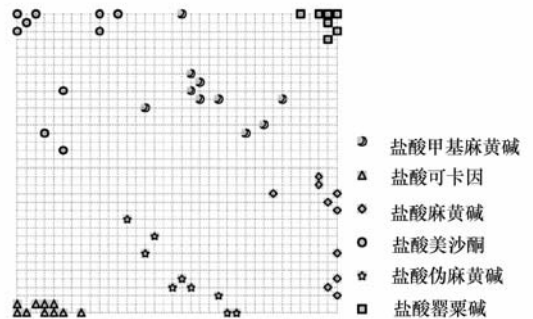


图9 SOM对6种毒品60个光谱的聚类结果

Fig.9 Sixty spectra of six illicit drugs clustered by SOM neural network

神经网络,每种样品10个光谱,通过SOM网络对其聚类,训练60 000次后的结果如图9所示。然后以训练好的SOM对12个待识别的60个光谱进行分类,分类结果如图10所示。在这两幅图中,不同的形状代表不同毒品的THz光谱,相同的形状代表相同的毒品不同次测得的光谱,空心点代表用来训练的光谱,实心点代表识别的光谱。从图9可以看出,相同毒品的光谱在网格中的距离要近些,不同毒品的光谱在网格中的距离大于相同光谱在网格中的距离,说明SOM网络将毒品的光谱进行了成功的聚类,实现了对不同毒品的

分类。图 10 的识别结果表明,训练好的 SOM 网络可以对不同毒品的 THz 光谱进行分类,即可以用神经网络来鉴定毒品的种类。

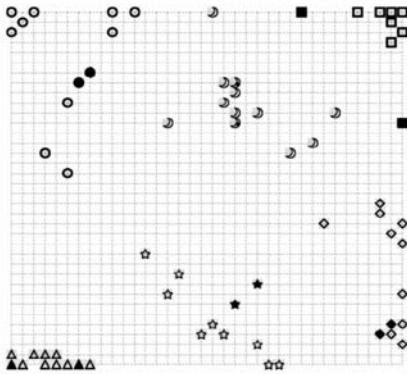


图 10 用训练好的 SOM 网络对 6 种毒品的 60 个光谱的识别结果,实心的标记代表用 SOM 网络识别的光谱

Fig. 10 Result of identification using well-clustered SOM neural network

支持向量机(SVM)是 V. Vapnik<sup>[18]</sup>提出的一种机器学习方法,由于其出色的学习功能,该技术已成为机器学习界的研究热点,并在很多领域都得到了成功的应用。由于 SVM 在高维小训练样本情况下有着很好泛化能力,并且相比于神经网络,尤其是自组织神经网络和 BP 神经网络<sup>[19]</sup>在参数设定和识别过程要节省很多时间,因此,采用 THz-TDS 技术对 9 种常见毒品纯品和 3 种混合物进行了实验研究,并在得到它们 0.2 ~ 2 THz 的特征吸收光谱的基础上,用 SVM 对毒品纯品和混合物的 THz 吸收光谱进行了识别分类。用归一化预处理后的 9 种毒品和面粉的 THz 吸收光谱训练 libsvm 模型,选用与训练光谱不同时间测得的毒品和混合物的 THz 吸收光谱作为检测光谱,经过归一化预处理之后分别输入到训练好的 libsvm 模型中进行识别,识别率达 100%。识别结果表明,用 SVM 可以实现对不同种类毒品的识别和鉴定,为 THz 光谱技术用于毒品的检测和识别提供了另一种有效的方法。

作者还研究了确定毒品纯度和有效成分含量的理论和实验方法<sup>[20]</sup>,采用吸收系数分别为  $\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega) \cdots \alpha_n(\omega)$  的  $n$  种样品  $S_1, S_2, \cdots,$

$S_n$  均匀混合成质量为  $M$  的混合样品,吸收系数  $\alpha(\omega) = \sum_{i=1}^n b_i \alpha_i(\omega)$ ,其中  $b_i$  为各已知成分的百分比,如果每个成分的吸收系数及它们混合物的吸收系数已知,那么通过线性回归的方法,就可以算出各成分的质量百分比。其中  $b_1 : b_2 : \cdots : b_n = m_1 : m_2 : \cdots : m_n$ ,这表明如果混合物和它的各个成分的吸收系数已知,就可以采用最小二乘法计算出混合物中各成分的百分比含量。将维生素 B6、维生素 C、蒽醌按一定比例混合,用该方法计算出各组分的含量并与实际含量做比较,结果见表 1,其绝对误差 > 2.99%,相对误差 > 7.64%,总体上 3 种成分的实际含量和计算含量基本一致。实验表明,用 THz-TDS 技术定量检测混合物各组分含量是可行的。

表 1 维生素 B6、维生素 C、蒽醌的实际含量及计算结果

Tab.1 Contains of vitamins B6, vitamins C, anthraquinone in experiment and calculation

	实际 含量/%	计算 含量/%	绝对 误差/%	相对 误差/%
维生素 B6	57.99	55.00	2.99	5.16
维生素 C	21.85	23.30	1.45	6.64
蒽醌	20.16	21.07	1.54	7.64

用高斯软件对个别品种的毒品进行光谱解析是该研究的另一方向,现已经完成了对甲基苯丙氨(MA)、氯氨酮、海洛因的光谱解析<sup>[21,22]</sup>。

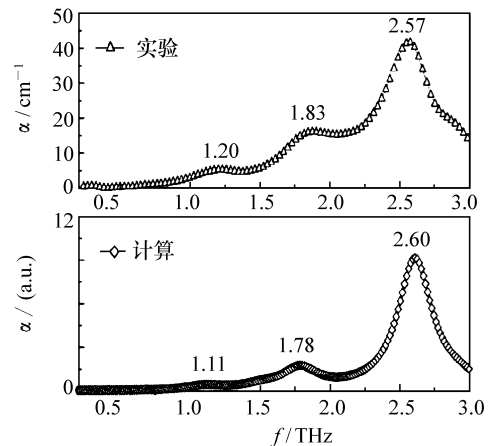


图 11 MDMA 的 THz 吸收光谱计算结果与实验结果  
Fig. 11 THz absorption spectra of MDMA by calculation and experiment



以二亚甲基双氧苯丙胺 (MDMA) 为例,在室温下提取了它在 0.2 ~ 2.6 THz 的时域光谱。利用密度泛函理论,将低频振动模型应用于 MDMA,使用高斯 GaussianView3.09 软件包计算其吸收谱。计算结果与实验结果对比见图 11。

对于 MDMA 来说,实验与计算结果符合的比较好,不仅吸收峰的个数相吻合,整体趋势也比较相似,只是有一些频率的偏移。计算得到的吸收峰 1.11、1.78 和 2.60 THz 分别对应于 1.20、1.83 和 2.57 THz。实验表明 THz-TDS 和离散傅里叶变换(DFT)很适合用于识别 MDMA 的分子振动的特征谱。

### 4.2 邮件检测

早在 2003 年,日本的 Kodo Kawase<sup>[23]</sup>就提出了在不拆开信封的情况下,通过提取信封内可疑物指纹谱的方法来识别信封内的毒品,并通过在特定频率成像的方法来区分信封内的毒品可疑物的种类。因此,利用 THz 时域光谱技术进行邮件检测,将毒品藏匿在信封中以合法的途径运毒将不再可能。图 12 是透过信封对 MDMA \methamphetamine \aspirin 3 种毒品在 7 个频率下的成像。

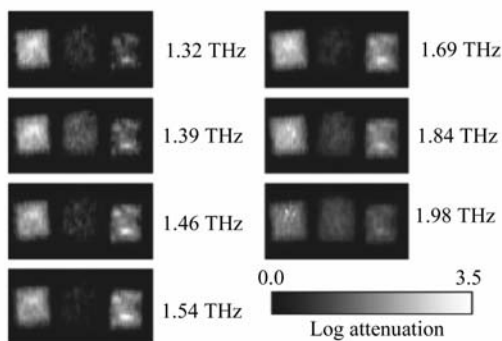


图 12 MDMA \methamphetamine \aspirin 3 种毒品在不同频率下的成像结果

Fig. 12 Three drug images in seven frequencies

在日本每天有成百上千封邮件需要检查,如果逐一用成像的方法对邮件进行检查,将是一项繁重的工作,因此,近年来,日本利用 THz 技术和 X 射照相技术设计了一套能快速高效地分类筛查邮件的装置,该装置现已投入日本邮局试用<sup>[24]</sup>,其产品结构如图 13 所示。

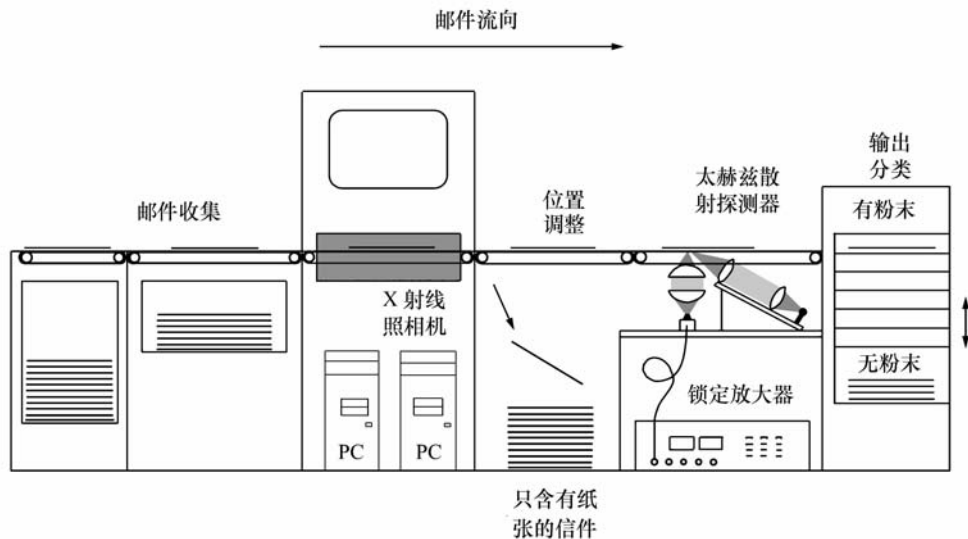


图 13 快速扫描系统结构图

Fig. 13 THz rapid screening system

该快速扫描系统用于迅速从大量邮件中筛选出可疑的信件,其过程分为 5 步:挑选厚度 2 cm 以下的信封;采用 X 射线照相技术拍摄,排除部

分只含有纸的信封;对 X 射线拍摄的信封照片中存在阴影部分的信件进行进一步检查,将只含有纸张的信件收集起来;用 THz 散射探测器将信封

中有可疑粉末的信件挑出,该散射探测器如图 14 所示,探测部分由肖特基二极管作 THz 产生源和探测器,信封中若存在可疑粉末,接收器将会接收到散射的 THz 波,实验证明毒品颗粒在微米量级

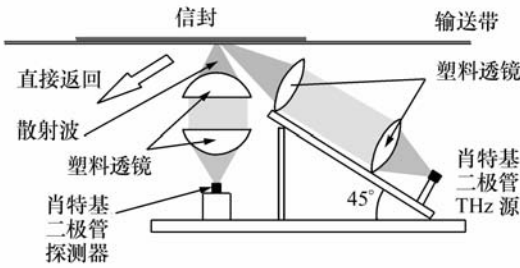


图 14 THz 散射探测装置图

Fig. 14 Optical setup of THz scattering detector

### 4.3 THz 脉冲雷达

近年来,异步电光取样方法的问世使 THz 技术向应用又迈进了一步。该方法由于能够迅速地进行电光采样,而不需要电动平移台,弥补了传统 THz 时域光谱的扫描光谱时间慢的缺点,因此,成为具有发展潜力的一项技术。

Takeshi Yasui<sup>[25]</sup>利用这项技术制造了 THz 脉冲车载雷达,图 15 为该雷达的结构示意图。雷达采用了典型的异步电光取样结构,用 PCA 作 THz 发射源和探测器,并采用了两台激光器。

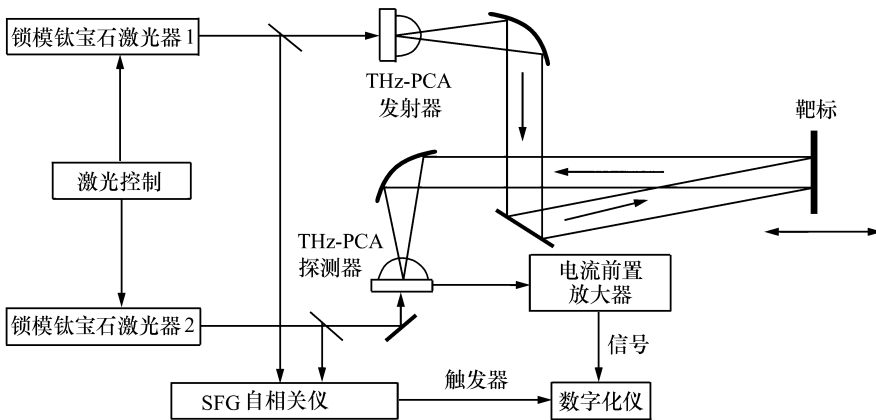


图 15 THz 脉冲雷达结构图

Fig. 15 Schematic diagram of terahertz impulse radar

当障碍物距探测器的距离改变,探测脉冲和门控脉冲光程会变长,从而可测算出障碍物距离的改变。该产品目前所能达到的测量精度在 2 mm 左右。

### 4.4 工业加工——塑料焊接点的无损检测

THz 时域光谱系统可以应用于塑料加工工业<sup>[26]</sup>。塑料作为一种重要的建筑材料,其质量的监管应予以重视。作为建筑材料,如果存在着气泡或者存在着生产过程中带入的一些掺杂物,会导致焊接点强度的急剧下降成为安全隐患。例如,生产用来运输天然气的聚乙烯管时,任何一处

焊接的缺陷都将引起巨大的风险和经济上的损失,因此,塑料焊接点质量检测是必要的。对于塑料的检测一直是工业生产上的一个难点,X 射线和超声都不能很好地解决对塑料制品的检测,其检测成功率很低,而正在发展当中的 THz 成像技术恰能克服这种限制,S. Wietzke 在实验中证明<sup>[27]</sup>,通过 THz 成像可以成功地检测塑料焊接处掺杂的沙子或者金属颗粒。此外,通过对焊接端的 THz 成像也可以检测出是否有脱层现象,从而确定产品某处是否适合焊接并选择合适的焊接范围。图 16 为塑料管焊接平面的成像图。

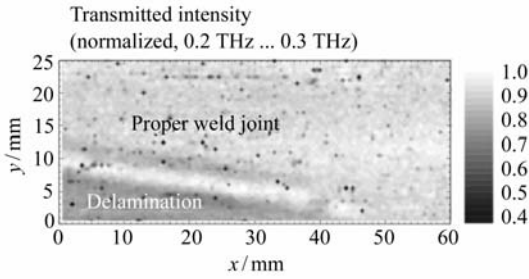


图 16 塑料管焊接处 THz 成像图

Fig. 16 THz image of end of plastic tube

#### 4.5 工业加工——塑料纤维走向及添加物含量的无损检测

纤维复合材料已广泛应用于航海、汽车制造等行业,纤维复合材料的无损检测是 THz 技术发挥作用的另一个重要领域。纤维复合材料有出色的力学性质,但也存在一定的缺陷,例如,作为飞行器壳体的石墨纤维复合材料,其结构由石墨纤维为骨架填充树脂材料制成,其优点是质量轻而坚固,缺点是被加热到 200 °C 以上容易被损坏,因此,检测石墨纤维复合材料的受热损坏程度是非常有意义的工作。Karpowicz<sup>[28]</sup>等人将 THz 技术引入纤维复合材料的无损检测中,对被火烧过的碳纤维化合物成像以确定损伤程度,由于石墨纤维是导电材料,对 THz 辐射不透明,对 THz 吸收较强,因此,采用了反射式成像方式。

玻璃纤维对 THz 几乎是透明的,Stoi 和他的合作者对航天用玻璃纤维化合物进行了深入的研究,检测样品是否有空隙,脱层以及力热损伤。除此之外,很多材料的力学性质与材料内添加纤维的比重和纤维的走向密切相关。因此,在利用这种材料制造对安全系数要求较高的重要零部件时,纤维含量和纤维走向两个指标十分重要,甚至要求在加工过程中对其进行监测。由于其它无损检测方法不能很好地解决这个问题,THz 时域光谱技术成为完成这项工作的主要方法。

近年来,S. Wietzke 等人做了纤维走向<sup>[29]</sup>和纤维含量<sup>[30]</sup>的测定工作。对于纤维含量的测定是通过测定混合物的介电常数来实现的,即利用了准静电有效介质理论<sup>[31]</sup>计算的介电常数来确定混合物成分含量。对于纤维走向的测定则是基

于他们提出的一种提取样品空间任一位置的纤维走向的算法,用不同偏振方向的 THz 波照射样品各表面,找到样品的 3 个主折射率从而确定纤维走向。

#### 4.6 THz 层析成像

相衬 X 射线计算层析照相法是一种新兴的成像技术,它可以利用第三代同步加速器辐射源或使用微聚焦 X 射线源来实现,在材料科学和医学中已经获得了有意义的结果。THz 波计算机层析成像是在 X 射线计算机层析成像的基础上发展的一种新型层析成像形式,利用了 THz 波和新的重构计算方法。这种技术使 THz 成像扩展到能够研究物体复杂的内部结构。由于 THz 波具有许多独特性质,所以 3DTHz 层析成像会有许多潜在的应用,如邮件包裹的检查、国土安检、物体内部结构的检查、无损检测等。

1997 年, Mittleman 等人<sup>[32,33]</sup>的研究已经实现了反射式 THz 层析成像,该研究小组通过数字信号处理算法成功地重构出了软盘的 3DTHz 像,但是,这种层析成像只能对有明显边缘的层状目标物体进行成像。利用透射式连续 THz 波成像系统也能实现计算层析成像。由于连续波成像系统省去了泵浦—探测成像装置,所需的元件数量很少,大大减小了光学系统的复杂性。同时系统也无需时间延迟扫描,成像速度得到了大幅度提高,所以这种层析成像将会有很大的实用价值。图 17 是通过测量数据的逆向计算实现的高尔夫球的三维重构图。T-CT 借用了已经很完善的 X-CT 领域的计算方法。

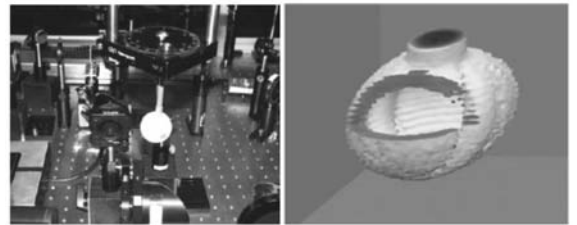


图 17 对高尔夫球的 THz 层析成像图

Fig. 17 Terahertz-tomography image of golf

此外日本的 Jun Takayanagi, Hiroki Jinno, Shingo Ichino 等人提出了一种用去卷积过程得出物体图像的方法<sup>[34]</sup>,使用去卷积方法得出的 3 张

纸的三维 THz 断层成像,如图 18 所示。

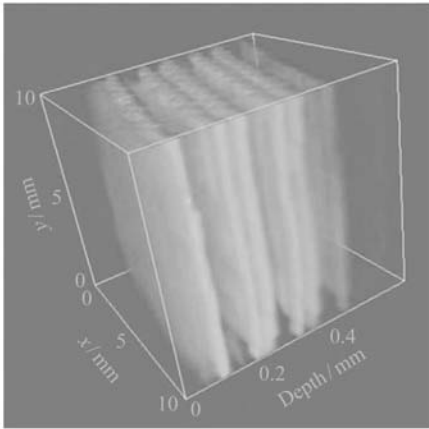


图 18 对纸张的 THz 层析成像图

Fig. 18 3D terahertz-tomography image of paper

## 5 结束语

本文系统介绍了 THz 波产生和探测方法,并对各种产生和探测方法进行了比较。其中利用空气等离子体产生和探测 THz 波对远程感测 THz 波的发展有重要价值。文章就 THz 时域光谱技术以及近年来发展的异步电光取样技术做了详细介绍,该系统采用了用两台激光器,两束飞秒激光分别作为泵浦脉冲和探测脉冲,利用两台激光器

的重复频率不同实现扫描,取代了传统的移动速度缓慢的电动平移台,该技术大大改善了 THz 波探测效率。本文对 THz 领域有代表性的应用研究做了介绍,如利用 THz 技术与 X 射线照相技术共同完成对邮件的快速检测;基于异步电光取样的 THz 脉冲车载雷达;利用 THz 时域光谱技术进行毒品检测;对纤维增强材料的纤维走向及纤维含量进行监测;THz 层析扫描技术等。本小组在毒品检测识别研究中,用 THz 时域光谱技术测量得到了 38 种纯度在 90% 以上的毒品的 THz 光谱,建立并丰富了毒品 THz 光谱数据库,在初步研究了“自然毒品”的光谱特征并利用特征峰识别、成像识别等方法对隐藏毒品进行识别的基础上,利用人工神经网络、SVM 等方法研究确定毒品纯度和有效成分含量的理论和实验方法,并用高斯软件对甲基苯丙氨(MA)、氯氨酮、海洛因等进行了光谱解析。

近年来,THz 研究受到了国内外学者的极大关注,许多高等院校和研究机构已建成 THz 实验室,并取得了一系列研究成果。进入 21 世纪以来,THz 波的产生和探测技术取得了突破性的进展,THz 应用技术已进入加速发展时期。可以预见在不久的将来,THz 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] 张存林,沈京玲. THz 感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社,2009.  
ZHANG C L, SHEN J L. *Terahertz Sensing and Imaging* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] COOK D J, HOCHSTRASSER R M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25: 1210-1212.
- [3] XIE X, DAI J M, ZHANG X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 075005.
- [4] HOUARD A, LIU Y. Polarization analysis of terahertz radiation generated by four-wave mixing in air[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(11): 1195-1197.
- [5] SUIZU K, KOKETSU K, SHIBUYA T, et al. . Extremely frequency-widened terahertz wave generation using Cherenkov-type radiation[J]. *Opt. Express*, 2009, 17: 6676-6681.
- [6] AUSTON D H, CHEUNG K P, VALDMANIS J A, et al. . Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 53: 1555-1558.
- [7] SUIZU K, TUTUI T, SHIBUYA T, et al. . Cherenkov phase - matched monochromatic THz wave generation using difference frequency generation with lithium niobate crystal[J]. *Opt. Express*, 2008, 16: 7493-7498.
- [8] 许景周,张希成. THz 科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.

- XU J ZH,ZHANG X CH. *THz Science and Technology and Application*[M]. Beijing:Peking University Press,2007. (in Chinese)
- [9] KOHLER R,TREDICUCCI A,BELTRAM F,*et al.*. Terahertz semiconductor heterostructure laser[J]. *Nature*,2002,417:156-159.
- [10] DAI J M,XIE X,ZHANG X C. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases[J]. *Phys. Rev. Lett.*,2006,97:103903.
- [11] YASUI T,SANEYOSHI E. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,87:061101.
- [12] JANKE C,FÖRST M,NAGEL M,*et al.*. Asynchronous optical sampling for high-speed characterization of integrated resonant terahertz sensors[J]. *Opt. Lett.*,2005,30(11):1405-1407.
- [13] SUN J H,SHEN J L,LIANG L SH,*et al.*. Experimental investigation on terahertz spectra of amphetamine type stimulants [J]. *Chin. Phys. Lett.*,2005,22(12):3176-3178.
- [14] LU M H,SHEN J L,LI N,*et al.*. Detection and identification of illicit drugs using terahertz imaging[J]. *J. Appl. Phys.*,2006,100:103104.
- [15] LIANG M Y,SHEN J L,WANG G Q. Identification of illicit drugs by using SOM neural networks[J]. *J. Phys. D:Appl. Phys.*,2008,41:135306.
- [16] 赵树森,陈思嘉,沈京玲.用支持向量机识别毒品的 THz 吸收光谱[J]. 中国激光,2009,36(3):752-757.  
ZHAO SH S,CHEN S J,SHEN J L. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drug using support vector machines[J]. *Chinese J. Lasers*,2009,36(3):752-757. (in Chinese)
- [17] XIONG W, SHEN J L,PAN R,*et al.*. A further component analysis for illicit drugs mixture with THz-TDS[J]. *SPIE*,2009,7385:7385I/1-7385/11.
- [18] VAPNIK V. *The Nature of Statistical Learning Theory*[M]. New York:SpringerVerlag,1995.
- [19] JIA Y,CH S J,LI N,*et al.*. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drug using back propagation neural networks[J]. *Chinese J. Laser*,2007,34(5):719-722.
- [20] JIANG D J,ZHAO SH S,SHEN J L. Quantitative analysis of the mixtures of illicit drugs using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *SPIE*,2007,6840:6840U/1-6840U/8.
- [21] LI N,SHEN J L,SUN J H,*et al.*. Study on the terahertz spectrum of methamphetamine [J]. *Opt. Express*,2005,13(18):6750-6755.
- [22] WANG G Q,SHEN J L,JIA Y. Vibrational spectra of ketamine hydrochloride and 3,4-methylenedioxyamphetamine in terahertz range[J]. *J. Appl. Phys.*,2007,102:013106.
- [23] KAWASE K,OGAWA Y,WATANABE Y. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints [J]. *Opt. Express*,2003,11(20):2549-2554.
- [24] HOSHINA H,SASAKI Y,HAYASHI A,*et al.*. Noninvasive mail inspection system with terahertz radiation[J]. *Appl. Spectroscopy*,2009,63(1):81-86.
- [25] YASUI T,KABETANI Y,YOKOYAMA S,*et al.*. Real-time, terahertz impulse radar based on asynchronous optical sampling[C]//Infrared, Millimeter and Terahertz Wave,2008,IRMMW-THz 2008,33rd International Conference,Pasadena, CA,2008.
- [26] WIETZKE S,JANSEN C. Industrial applications of THz systems[J]. *SPIE*,2009,7385:738506/1-738506/13.
- [27] WIETZKE S. Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints[J]. *J. European Opt. Society-Rapid Publications*,2007,2:07013.
- [28] KARPOWICZ N,DAWES D. Fire damage on carbon fiber materials characterized by THz waves[J]. *SPIE*,2006,6212:62120G/1-62120G/8.
- [29] JORDENS C,SHELLER M,WIETZKE S,*et al.*. Terahertz spectroscopy to study the orientation of glass fibres in reinforced plastics[J]. *Composites Sci. and Technol.*,2010,70(3):472-477.
- [30] WIETZKE S,JANSEN C,RUTZ F,*et al.*. Determination of additive content in polymeric compounds with terahertz time-

domain spectroscopy[J]. *Polymer Testing*,2007,26(5):614-618.

- [31] SCHELLER M, WIETZKE S, JANSEN C, *et al.*. Modelling heterogeneous dielectric mixtures in the terahertz regime: a quasi-static effective medium theory[J]. *J. Phy. D: Appl. Phys.*,2009,42:065415.
- [32] MITTLEMAN D M, HUNSCHE S, BOVIN L, *et al.*. T-ray tomography[J]. *Opt. Lett.*,1997,22:904-906.
- [33] JOHNSON J L, DORNEY T D, MITTLEMAN D M. Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2001,78(6):835-837.
- [34] TAKAYANAGI J, JINNO H, ICHINO S. High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser[J]. *Opt. Express*,2009,17:7549-7555.

**作者简介:**蔡 禾(1985—),男,北京人,硕士研究生,主要从事太赫兹光谱的研究。E-mail:caihe19850413@gmail.com  
郭雪娇(1986—),女,山东人,硕士研究生,主要从事太赫兹偏振的研究。E-mail:guoxuejiaohi@gmail.com  
和 挺(1984—),男,北京人,硕士研究生,主要从事太赫兹目标识别的研究。E-mail:heting54@gmail.com  
潘 锐(1983—),男,北京人,硕士研究生,主要从事太赫兹快速成像的研究。E-mail:peter\_pan211@139.com  
熊 伟(1983—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事太赫兹目标识别的研究。E-mail:vanxiong@163.com  
沈京玲(1957—),女,北京人,博士,教授,主要从事太赫兹光谱和成像以及红外无损检测技术的研究。  
E-mail:sjl-phy@mail.cnu.edu.cn

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊,中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地 址:长春市东南湖大路3888号

国内统一刊号:CN 22-1259/04

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn

网 址:www.yjxs.com