

太赫兹波谱与成像技术

郭澜涛¹, 牧凯军², 邓朝^{1,3}, 张振伟³, 张存林³

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450007; 3. 首都师范大学太赫兹光子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 太赫兹波谱与成像是太赫兹科学与技术的重要内容, 在生物、物理、化学、安检、航空航天等领域有重要的应用前景, 是近年来的研究热点。首先简单介绍了太赫兹时域光谱、时间分辨光谱和超连续谱等波谱技术, 并列出了相关波谱技术对爆炸物识别和对半导体材料超快载流子动力学的研究结果。讨论了时域扫描成像、实时焦平面成像、连续波成像和被动成像等太赫兹成像技术。相应地分别给出了利用上述技术对葵花籽、玩具手枪、航天泡沫和人体的成像研究结果。

关键词: 太赫兹; 波谱; 成像

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)01-0051-06

Terahertz spectroscopy and imaging

Guo Lantao¹, Mu Kaijun², Deng Chao^{1,3}, Zhang Zhenwei³, Zhang Cunlin³

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450007, China;
3. Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz (THz) spectroscopy and imaging, as the focus of THz science and technology, can be applied in many fields, such as biology, physics, chemistry, safety check, aerospace, etc. And now they are becoming international attractive field especially in recent years. Firstly, the THz time domain spectroscopy, time resolved THz spectroscopy and THz supercontinuum technology were discussed briefly. Results for characteristic identification of explosives and research on dynamics of ultra-fast charge carrier by using different THz spectroscopy were presented. Meanwhile, the THz time domain scan imaging, real time focal plane imaging, continuous wave imaging, and passive THz imaging technologies were introduced respectively. In application study, research on sunflower seeds by using THz time domain scan imaging technology, plastic cap gun covered by canvas using real time focal plane imaging technology, aerospace foam and pistol model by using continuous wave imaging technology, human body by using passive THz imaging technology were all presented correspondingly.

Key words: terahertz; spectroscopy; imaging

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2012YQ140005)

作者简介: 郭澜涛(1978-), 男, 博士生, 主要从事太赫兹光谱与成像技术方面的研究。Email: guolantao@gmail.com

导师简介: 张存林(1961-), 男, 博士生导师, 主要从事太赫兹光谱与成像技术研究、红外热波无损检测技术方面的研究。

Email: cunlin_zhang@yahoo.com

0 引言

太赫兹段是指频率从 0.1~10 THz, 介于毫米波与红外之间的电磁辐射区域, 其成像和光谱技术可提供传统的微波、红外等技术所不能提供的信息。近 20 年来, 由于超快激光技术的发展, 为 THz 波提供了稳定、可靠的激发光源, 使 THz 波的基础和应用研究得到了蓬勃发展。其中, THz 光谱和成像研究近年来在物理、生物、化学、安检、航空航天等领域逐渐成为研究热点^[1]。

1 太赫兹波谱技术

许多分子的转动频率, 大分子官能团的振动模式, 生物大分子的谐振频率, 电子材料的低能激励, 凝聚态相位介质的低频振动模式等都处在 THz 波段。因此, THz 光谱技术对于研究基础物理相互作用具有重要意义。目前, 常见的 THz 光谱技术有时域光谱技术, 时间分辨光谱技术和超连续发射光谱技术等。

1.1 太赫兹时域光谱技术

太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)一般使用泵浦探测测量方法, 可得到样品的复折射率, 介电常数和电导率等参数。通过分析这些参数, 可得到样品的物理化学信息。

典型的 THz-TDS 系统主要由飞秒激光器、THz 产生装置、THz 探测装置和时间延迟控制系统组成, 如图 1 所示。

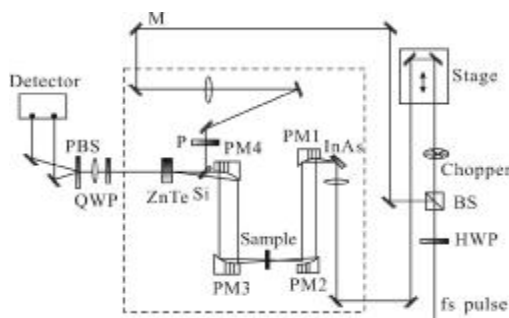


图 1 太赫兹时域光谱系统
Fig.1 Schematic of THz TDS

飞秒激光通过分束镜后, 较强的一束作为泵浦光, 通过可变延迟线入射到太赫兹发射晶体上产生 THz 脉冲, 经两组离轴抛物面镜后被聚焦到探测晶体上; 另一束较弱的反射光作为探测光, 经过多次反射

后通过一个偏振片, 而后由硅片将其反射到探测晶体上, 使探测光与 THz 脉冲共线通过探测晶体。由于 THz 脉冲电场可使通过电光探测晶体的探测脉冲的偏振态发生改变, 从而可间接探测出 THz 脉冲电场的大小及其变化情况。当偏振态改变后的探测脉冲经 $\lambda/4$ 波片后被偏振分束镜分成偏振方向相互垂直的两束光, 而后经由一个双光电探头连接到锁相放大器上, 最后经过计算机进行相应的数据采集。通过后续数据处理可以获得样品的吸收系数等相应光学参数。图 2 为 TNT、HMX、2,4-DNT 和 RDX 4 种爆炸物的 THz 特征谱, 从中可以看到它们在所研究的 THz 波段都有明显的特征吸收峰。根据这些特征吸收峰可以鉴别出爆炸物种类, 由此可有效对人体炸弹等潜在危险进行检测、预警等, 首都师范大学近年来在爆炸物和毒品检测方面开展了系列研究^[2-5]。

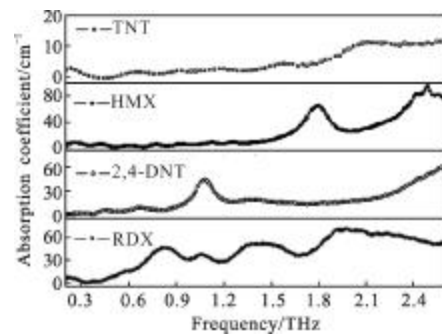


图 2 爆炸物的太赫兹特征谱

Fig.2 Identified results of characteristic of explosives using THz-TDS

1.2 时间分辨太赫兹光谱技术

时间分辨 THz 光谱技术是光学泵浦技术和 THz-TDS 结合的一种非接触式电场探测技术, 其分辨率在亚皮秒量级。相对于 THz-TDS, 时间分辨 THz 光谱技术更加复杂, 前者所测得的信息为样品的静态特性, 而后者能测得样品的动态变化信息。

时间分辨 THz 光谱系统利用同步产生的红外泵浦脉冲和太赫兹探测脉冲实现测量, 如图 3 所示。该种光谱系统主要有 3 支路: 产生支路、探测支路和可见光泵浦支路。当样品被激励之后, 样品的介电常数会发生改变, 随即被 THz 脉冲探测。通过改变泵浦脉冲和探测脉冲之间的时间延迟, 可实验测得多种动态过程, 如载流子注入、冷却、衰变和捕获等。当可见光脉冲激励样品之后, 可利用时间分辨 THz 光谱技术研究这种变化。

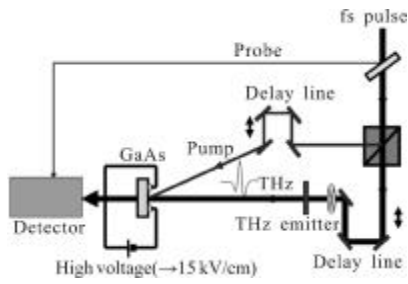


图 3 时间分辨的太赫兹光谱系统

Fig.3 Schematic of time resolved THz-TDS

时分辨的 THz 光谱技术通常用来研究半导体材料,如硅(Si)、砷化镓(GaAs)等半导体材料的超快载流子动力学。图 4 为 0.5 mm,晶向为<110>的 GaAs 在未加外置偏压电场的情况下,不同泵浦能量所对应的泵浦探测一维扫描结果。其中,纵坐标中的 T_0 为受光激励时的 THz 峰值透过率, ΔT 为受光激励后峰值透过率与 T_0 的差值;而横坐标的延迟时间为光泵浦路和 THz 产生路之间的时间延迟。插图表示未加电场时载流子弛豫时间与泵浦光能量的关系。从图中可以看出泵浦光能量越大,THz 透过率越小。但是泵浦光能量与载流子浓度的关系几乎成线性关系。而后随着时间延迟的增加,光生载流子会迅速复合,其浓度会相应减小。

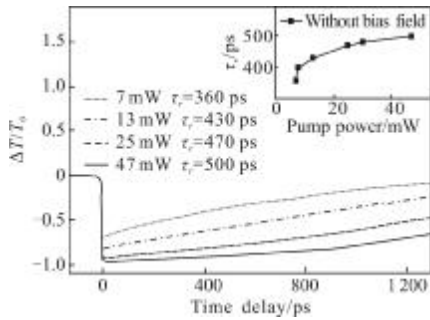


图 4 GaAs 在不同泵浦能量下太赫兹的传输结果

Fig.4 THz transmission results of GaAs under different pump power

1.3 太赫兹超连续发射光谱技术

THz 发射光谱系统利用样品为系统自身的 THz 发射极。利用 THz 发射光谱技术可对半导体、超导体、异质结构、溶剂中的定向分子和磁膜等材料进行研究。

高能 THz 超连续谱具有高时间分辨率(飞秒量级)、高脉冲能量(几十微焦量级)等优点,可广泛应用于物理、化学和生物等基础科学,以及半导体学、电子学和非线性光学等领域的研究。另外由于 THz 超

连续谱的光谱覆盖范围宽,它在吸收光谱学研究方面具有重要作用。

首都师范大学利用干涉仪对金属薄膜样品的高能 THz 超连续发射谱进行了研究,如图 5 所示。其中,图(a)为产生区,图(b)为相干区,图(c)为探测区。飞秒激光聚焦在金属薄膜样品上,由于强激光与金属相互作用可产生自由电子,而这些自由电子在金属表面的表面等离子场作用下加速运动产生 THz 超连续谱,而后离轴抛物面反射镜将其准直为一条平行光。通过分束镜(高阻硅)THz 波被分为两束强度比接近的反射光和透射光。利用迈克尔逊干涉仪结构使 THz 波发生自相关作用,即 $I_D(\tau) = \langle E_{THz}(t)E_{THz}(t-\tau) \rangle$, 可得 THz 超连续谱的时域干涉波形,经过傅里叶变换最终得到超连续谱的频谱分布。另外,由于探测器是热动型探测器(高莱探测器),它对热辐射背景和其它光辐射噪声较为敏感,所以我们利用隔热材料将光路分为 3 个部分,并在探测器窗口紧贴一硅片以减小背景干扰,如图 5 中虚线框所示。利用该系统最终可得到频谱分布在 0.25~150 THz 波段以上,能量高于 60 μJ,能量转换效率~10⁻² 的 THz 超连续谱,如图 6 所示。

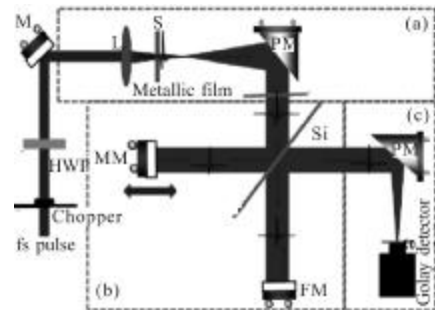


图 5 太赫兹超连续谱产生和探测系统示意图

Fig.5 Schematic of THz supercontinuum generation and detection system

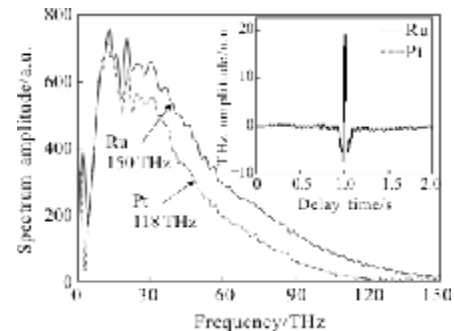


图 6 两种金属薄膜的太赫兹超连续发射谱

Fig.6 THz supercontinuum of two kinds of foil

2 太赫兹成像

由于 THz 波的透过性、无损性以及大多物质在 THz 波段都有指纹谱等特性,使 THz 成像相比其他成像方式更具优势。

在成像方式上,近年来涌现出脉冲 THz-TDS 成像、THz 实时焦平面成像,THz 连续波成像等成像技术,可应用于生物医学、安全检查,无损检测等众多领域。

2.1 时域逐点扫描成像

THz 脉冲时域光谱成像技术与一般的强度成像不同,它的显著特点是信息量大。THz 逐点扫描成像系统就是在 THz-TDS 系统中将样品放置在二维扫描平移台,样品可以在垂直于 THz 波传输方向的 x-y 平面移动,从而使 THz 波通过样品的不同点,记录样品不同位置的透射和反射信息,对样品上每一个像素点提取 THz 时域波形,利用各个点的样品信息实现物体重构。以葵花籽逐点扫描成像为例,图 7 中列举了 3 种 THz 时域逐点扫描成像处理结果。其中,图(a)为飞行时间成像,图(b)为时域最大值成像,图(c)为频域最大值成像(实验装置可参看图 1)。

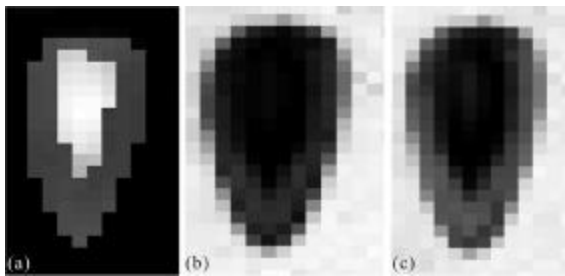


图 7 葵花籽太赫兹逐点扫描成像(扫描步长 1 mm)
Fig.7 THz image of sunflower seeds(scanning step is 1 mm)

THz-TDS 二维逐点扫描成像适用于高精度测量。该方法测量结果分辨率高,受背景噪声的干扰小,信噪比高(可达 10⁴)但同时它也存在扫描时间过长、不适合用于大样品成像、无法测量动态信息等问题。

2.2 实时焦平面成像

THz 实时成像技术可以克服成像时间过长的缺点。样品放在一个 4f 成像系统当中,而后利用大尺寸的 ZnTe 晶体和 CCD 相机作为接收装置,无需对样品进行二维扫描就能直接获取整个样品的光谱信息,因而可克服逐点扫描时间过长的缺点,如图 8 所

示,该装置为反射式 THz 实时成像系统的一种。

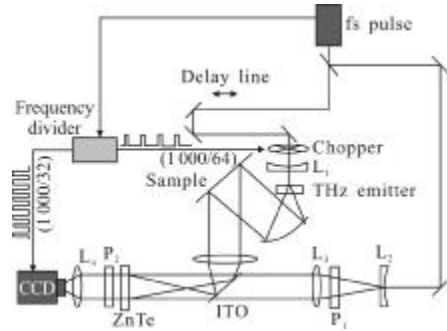
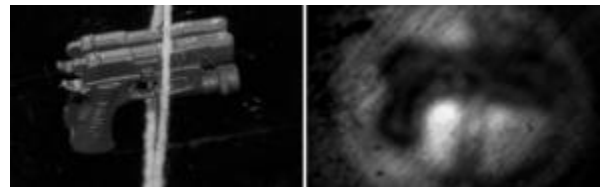


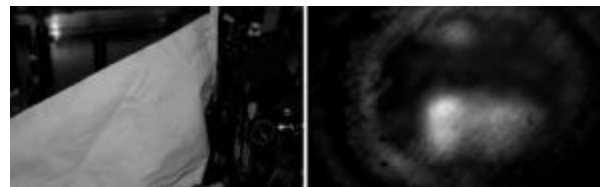
图 8 太赫兹实时焦平面成像系统
Fig.8 Schematic of THz real-time imaging system

实验中 THz 脉冲在样品表面的入射角度为 15°。聚乙烯透镜将物体成像在大尺寸的 ZnTe 探测晶体上。探测光束被扩束并与 THz 脉冲共线通过探测晶体。当探测光束透过一对相互垂直的起偏、检偏器后,电光晶体中的 THz 二维电场分布就转化为探测光的二维光强分布,于是 THz 图像间接地被 CCD 相机记录。

利用该方法可对运动物体或活体进行成像,在国土安全领域有很好的应用前景,可以探测隐蔽的危险物品,如图 9 所示,是对塑料玩具手枪进行了 THz 实时成像^[6]。



(a) 塑料玩具手枪的光学图像 (b) THz 图像
(a) Photo of plastic cap gun (b) THz image of plastic cap gun



(c) 覆盖帆布的实物图像 (d) 帆布下的 THz 图像
(c) Photo of plastic cap gun under canvas (d) THz image of plastic cap gun under canvas

图 9 塑料玩具手枪的实时 THz 图像
Fig.9 Real-time THz images of plastic cap gun

2.3 连续波成像

THz 连续波成像系统和 THz 脉冲成像系统相比,具有以下优势:光谱功率高、系统集成度高、体积

小、成本相对较低、成像速度快。图 10 为首都师范大学太赫兹实验室的连续波成像系统示意图。图中,图(a)为反射式,图(b)为透射式。图中的连续波源为返波管或耿氏管,探测器为热释电探测器、高莱探测器或肖特基二极管。样品被置于一个二维平移台上,通过计算机控制平移台,可实现对样品的二维成像。可将耿氏管和肖特基二极管集成为一个太赫兹单元,如图10(a)中虚线框中所示,既极大地缩小了系统尺寸,又可进行高速反射式成像。利用 THz 连续波成像系统可以快速进行相关的安全检查、无损检测、雷达扫描等应用,如图 11 所示。其中,图(a)为用耿式振荡器

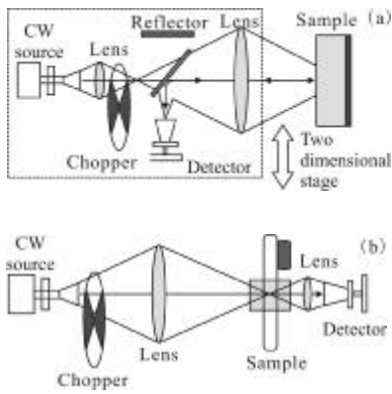
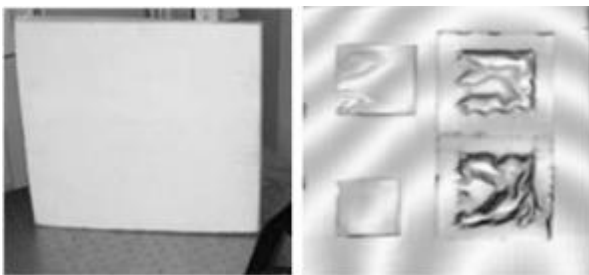


图 10 太赫兹连续波成像系统

Fig.10 Schematic of CW THz imaging system



(a) 航天泡沫

(a) THz images of foam



(b) 手枪模型

(b) THz images of pistol model

图 11 太赫兹连续波成像结果

Fig.11 Continuous wave THz imaging results

作为辐射源,肖特基二极管作为探测器的成像系统对航天泡沫预埋缺陷的反射式成像结果,图(b)为采用耿式振荡器作为辐射源,肖特基二极管作为探测器的远距离成像系统对手枪模型进行的 25 m 远的远距离成像结果。

2.4 被动成像

由于 THz 波段的探测器受加工工艺限制,制作困难且造价昂贵,所以被动 THz 成像还不能达到 CCD 相机或红外焦平面阵列那样方便的形成二维图像。因此,采用较少的 THz 波探测单元和光学机械相结合的扫描模式是目前现实的被动 THz 快速扫描成像技术。这种扫描方式不仅可实现速度快、分辨率高、视场大等需求,而且显著地降低了系统成本。图12为被动 THz 成像系统原理示意图及其对人体的成像结果。

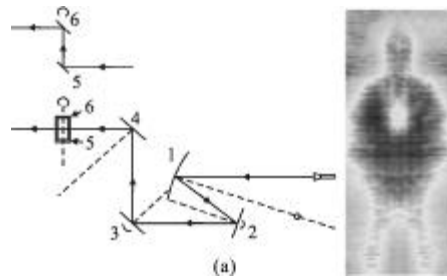


图 12 被动太赫兹成像系统原理与结果

Fig.12 Schematic of passive THz imaging system and results

被动式 THz 成像系统主要由光机扫描部分、成像前端、高速数据采集和传输部分以及基于计算机的图像显示部分组成。其中核心的是光机扫描部分,主要功能是完成对物方空间的二维快速扫描;成像前端的主要功能是将 THz 信号转换成直流电压信号,以供数据采集。高速的数据采集和传输部分主要功能是完成对光机扫描部分的控制,并且对来自成像前端的输出信号进行采集和传输;图像显示部分

的主要功能是将来自光机扫描部分的同步信号和来自成像前端的输出信号进行处理,重构出被测人体的图像。图 12 中,图(a)为双转镜式被动 THz 成像系统原理示意图与成像结果。该系统中采用了一对对转的平面镜进行行扫描,这两块平面镜的法线与旋转轴之间均有一定夹角。另一块平面镜进行帧扫描,从而实现对被测目标的二维扫描。该系统成像距离为 1.5 m,成像范围为 0.5 m×1.8 m,成像时间为 12 s,探测频率为 0.1 THz,图像分辨率为 10 cm。图(b)为多面体镜式被动 THz 成像系统原理示意图与成像结果。该系统通过一块多面体转镜的旋转完成竖列扫描,同时该多面体转镜绕其竖直摆动轴进行往复摆动,从而完成帧扫描。该系统成像距离为 1.5 m,成像范围为 1 m×1.8 m,成像时间为 4 s,探测频率为 0.2 THz,图像分辨率为 5 cm^[7]。

3 结 论

文中总结了 3 种 THz 光谱技术:THz-TDS、时间分辨的 THz 光谱技术和 THz 超连续发射光谱技术,具体介绍了 THz 的 4 种成像技术,包括时域扫描成像、实时焦平面成像、连续波成像和被动成像等,给出了一些应用研究结果。随着电子学、半导体等相关技术的发展,太赫兹波谱与成像技术的研究将不断深化,应用领域不断拓展。

参 考 文 献:

- [1] Zhang Cunlin. Terahertz Sensing and Imaging [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] Zhou Qingli, Zhang Cunlin, Mu Kaijun, et al. Optical property and spectroscopy studies on the explosive 2,4,6-trinitro-1,3,5-trihydroxybenzene in the terahertz range [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 101-106.
- [3] Guo Lantao, Hu Ying, Zhang Yan, et al. Vibrational spectrum of γ -HNIW investigated using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Optics Express, 2006, 14(8): 3654-3659.
- [4] Li Ning, Shen Jingling, Sun Jinhai, et al. Study on the Terahertz spectrum of methamphetamine [J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6750-6755.
- [5] Wang Guangqin, Shen Jingling, Jia Yan. Vibrational spectra of ketamine hydrochloride and 3,4-methylenedioxyamphetamine in terahertz range [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102: 013106.
- [6] Zhang Liangliang, Nick Karpowicz, Zhang Cunlin, et al. Real-time Nondestructive imaging with THz waves [J]. Optics Communications, 2008, 281: 1473-1475.
- [7] Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, et al. Object detection research using passive THz imaging [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 33(2): accepted. (in Chinese)
张馨, 赵源萌, 邓朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 已接受.