

太赫兹时域光谱成像处理方法的研究

杨 昆 赵国忠 梁承森

(首都师范大学物理系, 北京 100048)

摘要 对太赫兹时域光谱成像在时域和频域两种模式下不同处理方法进行了研究。太赫兹波时域光谱成像技术与一般的强度成像不同,它具有信息量大、同时含有振幅和位相信息等显著特点。根据不同需求,可以选取不同的物理量来展示不同的成像特征,以便提供更多、更精确的样品信息。每一个像素点对应一个时域波形,可以从时域信号或它的傅里叶变换谱中选择任意数据点的振幅或位相进行成像,从而重构样品的空间密度分布、折射率和厚度分布。在频域模式下以不同频率点的振幅、吸收率、折射率、功率作为参数进行成像,进行了太赫兹波多光谱成像技术的初步研究。这些研究结果对提高太赫兹成像的分辨率和太赫兹图像识别有着重要的意义。

关键词 太赫兹; 光谱成像; 时域; 频域

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0102

The Method of Image Processing of Terahertz Time-Domain Spectral Imaging

Yang Kun Zhao Guozhong Liang Chengsen

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100049, China)

Abstract The method of image processing of terahertz time-domain spectral imaging in the time-domain and frequency-domain is discussed. Compared to other intensity imaging, terahertz time-domain spectral imaging technology has an obvious advantage that it has a large amount of information. According to different requirements, different image characteristics are demonstrated by selecting different physical parameters in order to provide more accurate sample information. Each pixel corresponds to a time-domain waveform so that any amplitude or phase data point from the time-domain signal or its Fourier transform spectrum can be used to make graphs to remodel the space density distribution, the refractive index and the thickness distribution of samples. It is worth mentioning that, in the frequency-domain model, graphs can be made by different parameters at each frequency, such as amplitude, absorption, refractive index, energy, power and so on, which can be used to investigate the terahertz multi-spectral imaging technology. The results of these researches have important significance to improve the resolution of THz imaging and THz image recognition technology.

Key words terahertz; spectral imaging; time-domain; frequency-domain

1 引 言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 3000~30 μm)范围内的电磁波,它在电磁波谱中占有很特殊的位置,处于电子学向光子学的过渡区域。很多在可见光和红外波段不透明的材料,太赫兹波可以穿透^[1, 2]。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 辐射的机理研究、检测技术和

应用技术得到蓬勃发展。

自 1995 年太赫兹电磁波被首次用于成像以来,各种太赫兹成像技术相继问世。太赫兹成像技术在近几年间引起了世界范围内的广大相关科学工作者的极大关注与兴趣并由此展开了大量的相关研究,太赫兹成像技术已经初步覆盖了广泛的应用领域^[3]。太赫兹成像在反恐、假币识别、邮政系统安全、化学物质检测、机场安检、光学生物医学成像、金

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408, 2006CB302901)、国家自然科学基金(10474067)和北京市自然科学基金(4073030)资助课题。

作者简介: 杨 昆(1982—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: nukgnay@sohu.com

导师简介: 赵国忠(1964—),男,教授,主要从事太赫兹光谱与成像等方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn (通信联系人)

属及塑料地雷探测、航空航天飞行器用金属及复合材料的无损探伤等应用层面上，显示出了良好的潜在应用前景^[4~9]。

2 实验系统

本文实验测量采用的是透射式 THz 脉冲成像系统，光路如图 1 所示。主要由飞秒激光器、太赫兹辐射产生装置、太赫兹辐射探测装置和时间延迟控制系统组成。飞秒激光脉冲中心波长为 800 nm，重复频率为 82 MHz，脉宽为 100 fs，输出功率为 1043 mW。太赫兹脉冲产生和探测的装置分别是<100>晶向的砷化铟(InAs)晶体和<110>晶向的碲化锌(ZnTe)晶体。飞秒激光脉冲经分束棱镜(PBS)被分为两束，一束作为产生太赫兹脉冲的抽运光，另一束作为探测太赫兹脉冲的探测光。抽运光经过频率为 1.1 kHz 的斩波器调制，通过时间延迟台入射到透镜 L₁，经透镜聚焦以 45° 入射角照射在 InAs 晶体

表面上，激发 InAs 晶体表面耗尽层载流子的跃迁，辐射出太赫兹脉冲，接着产生的太赫兹脉冲经两对表面镀金的离轴抛物面镜(PM)准直和聚焦，通过一个高阻硅薄片，聚焦在 ZnTe 晶体上；另一束激光脉冲—探测光经过一系列的反射镜、透镜 L₂、偏振片 P 与太赫兹脉冲同时聚焦在 ZnTe 晶体的同一位置，此时 ZnTe 晶体中发生电光效应，导致通过电光晶体的探测光偏振态发生变化，从而反映出太赫兹辐射电场的大小及变化。偏振态被调制的探测光经过四分之一波片(QWP)和透镜 L₃ 聚焦到渥拉斯顿棱镜(WP)，探测光被其分为偏振方向互相垂直的两个分量，被差分探测器—光电二极管探测，得到的两个分量差分信号经锁相放大器解调后输入计算机得到最终的太赫兹脉冲时域信息。该系统探测到的有效谱宽是 0.2~2.6 THz，频谱分辨率为 50 GHz，信噪比为 600。实验中，样品被放置在能量较高的离轴抛物面镜 PM₂ 焦点处。

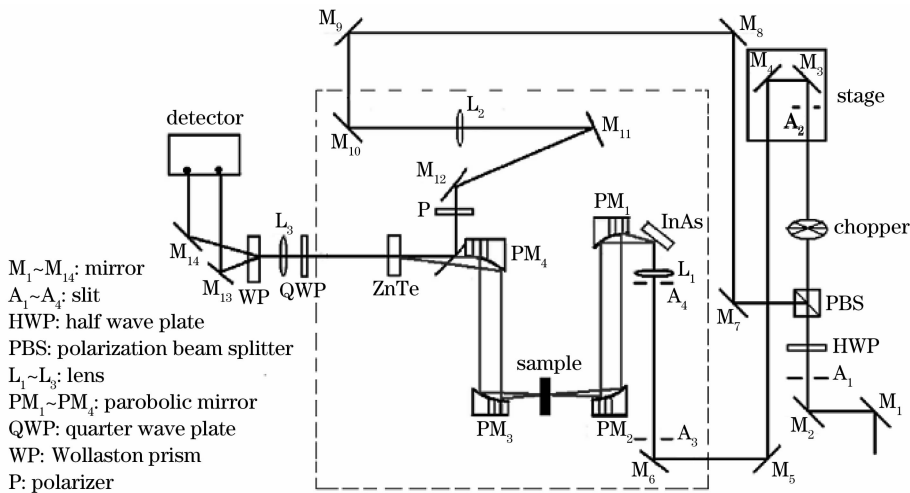


图 1 太赫兹透射型脉冲成像系统光路图

Fig. 1 Schematic view of the experimental setup

3 成像过程及分析

THz 波被聚焦元件聚焦到样品的某一点上。收集元件则将透过样品(或从样品反射)的 THz 波收集后聚焦到 THz 探测元件上。THz 探测元件将含有位置信息的 THz 信号转化为相应的电信号。图像处理单元将此信号转换为图像^[10]。

实验样品是由黑索金(RDX)、钝化黑索金(DERDX)、钝化太铵(PETN)和奥克托金(HMX)组成的，每个样品圆片的直径是 1.30 cm，样品厚度为 1.36 mm，样品的实际摆放位置(分别为左上方 DERDX、右上方 PETN、左下方 RDX、右下方

HMX)、模型及扫描范围如图 2 所示(虚线框即为实际扫描范围)，在太赫兹焦点位置处利用二维平移台对样品逐点扫描成像。实验扫描范围为 2 cm×2 cm，

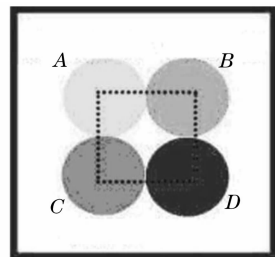


图 2 实验样品及其模型扫描范围示意图

Fig. 2 Schematic view of sample and scan area

平移台的步长为 0.465 mm, 扫描点数, 即像素点为 44×44 。

太赫兹时域光谱成像技术与一般的强度成像不同, 它包含很大的信息量。每一个成像点对应一个时域波形, 可以从时域谱或其傅里叶变换谱(频域谱)中选择任意某个数据点的振幅或位相进行成像, 从而重构样品的空间密度分布、折射率和厚度分布。

4 实验结果

根据对时域或频域中不同物理量的选取, THz 成像可以表达成各种形式, 不同表达方式可以解释不同特征, 以便提供更多、更精确的样品信息。因此处

理数据的方法在 THz 成像中就显得尤为重要。我们从不同的角度列举了一些可行的数据处理方法, 得到不同模式的四种爆炸物样品的 THz 透射图像。

4.1 时域模式

时域模式是在 THz 电场的时域波形中提取出反映样品信息的数据进行成像。大体可以分为两类: 一类是振幅成像, 如图 3 所示, 包括振幅最大值成像、振幅最小值成像、振幅峰峰值成像、能量成像、微分谱成像, 主要反映样品的厚度和吸收特性; 另一类是相位成像, 如图 4 所示, 包括最大值对应时间点成像、最小值对应时间点成像、飞行时间成像(峰值与参考相比)主要反映样品厚度及其折射率信息。

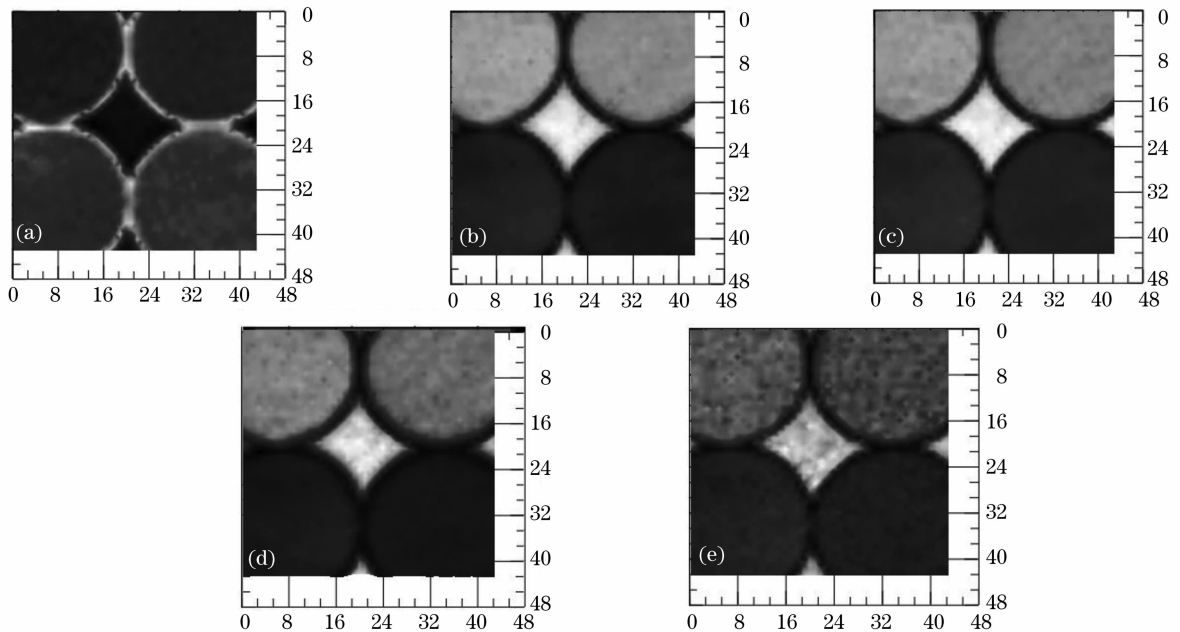


图 3 时域振幅成像图。(a)振幅最大值成像;(b)振幅最小值成像;(c)振幅峰峰值成像;(d)能量成像;(e)微分谱成像

Fig. 3 Image of time-domain amplitude. (a) maximum amplitude imaging; (b) minimum amplitude imaging; (c) peak-to-peak value imaging; (d) energy imaging; (e) differential imaging

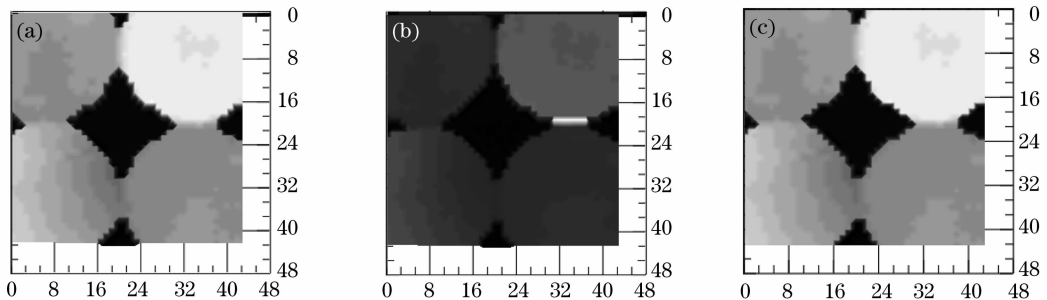


图 4 时域位相成像图。(a)最大值对应时间点成像;(b)最小值对应时间点成像;(c)飞行时间成像

Fig. 4 Image of time-domain phase. (a) phase image at the time of maximum amplitude; (b) phase image at the time of minimum amplitude; (c) time-of-flight image

任一时域信息的变化, 都是样品对频域中所有频率成分影响的综合反映, 是一个平均的效果。这

一特点决定了采用时域信息进行成像通常都有较好的成像效果, 不同成像方法之间像质差别也比较小。

4.2 频域模式

频域模式都是在 THz 电场的频域波谱中提取出反映样品信息的数据进行成像的。针对频谱中某一特定频率所对应的振幅、功率、位相、吸收系数或折射率,反映的是样品在不同频率下光学性质所存在的差异,所得图像的对比度变化明显。由于 THz 光谱宽度在 2.0 THz 以上,其高频分量具有更短的波长,根据瑞利判据,波长越小其分辨率越高,而随着频率的增大可实现更高的空间分辨率。

不同频率下的成像方法也提供了新的研究方向,即太赫兹多光谱成像及其识别技术。主要思路是:首先,使用太赫兹多光谱成像数据处理程序,在样品矩阵数据中均匀提取出从 0.2~2.6 THz 之间若干幅图像;然后,按频率从低到高的顺序把相应的图像排列出来;最后,根据图像中每个样品随频率增加时的变化趋势,即每个样品的明暗变化趋势,把它与样品的指纹谱对比,趋势一致的就是相对应的样品。

如图 5 所示,依据透射谱的原理,并按照上一段

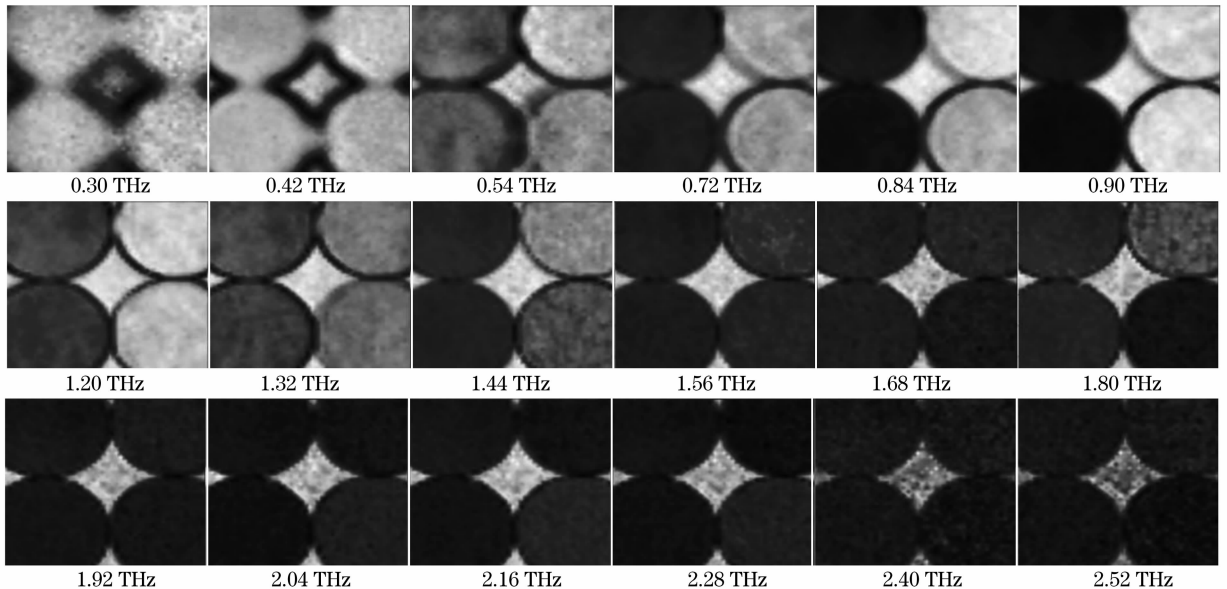


图 5 随频率增加样品吸收效果变化规律图

Fig. 5 Imaging of sample with increasing frequency

把不同成分的样品作为研究对象,在太赫兹脉冲扫描成像系统中,对指定的区域进行逐点扫描成像,利用太赫兹多光谱成像技术,提取不同频率点对应的图像。图像中颜色的深度变化,反映出不同样品在该频率点的吸收不同,随着频率增加,样品图

中所讲述的识别方法得到变化图像(图像顺序是先上后下,先左后右),图 6 所示曲线,分别是 DERDX、PETN、RDX、HMX 的吸收谱。观察图 5 左侧的两个样品可以发现,在 0.84 THz 附近它们很暗,说明这两个样品在 0.84 THz 附近的吸收很大,并且左下角的更暗,对比样品的指纹谱,说明左下角的样品是 RDX,左上角的样品是 DERDX。再观察右侧的两个样品,右下角的样品先于右上角的样品暗,而后右上角的样品才比右下角的暗。表明相对于右上角的样品,随着频率的增加,右下角的样品吸收先增加后减小,对比样品指纹谱,说明右下角的样品是 HMX,右上角的样品是 PETN。当然,也可以通过吸收峰来识别这四种样品,左侧两个样品的吸收峰在 0.84 THz 附近,并且左下角样品的吸收更大,对比样品的指纹谱,说明左下角的样品是 RDX,左上角的样品是 DERDX;右下角样品的吸收峰在 1.80 THz 附近,右上角样品的吸收峰在 2.0 THz 附近,对比样品的指纹谱,说明右下角的样品是 HMX,右上角的样品是 PETN。

像不断改变,根据建立的样品指纹谱数据库,比较不同的曲线走向,就可以方便地识别出样品。同理,我们可以作出不同频率的功率、吸收系数、折射率的图像,再对照相应物理量的频域谱,依然可以辨别不同成分的样品。

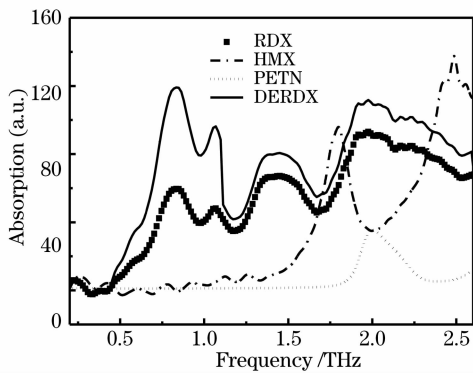


图 6 四种爆炸物样品的指纹谱

Fig. 6 Absorption spectrum of four explosive samples

5 结 论

太赫兹成像技术发展至今已十几年,但是无论从基础研究还是应用基础研究的角度看,都还有许多工作要做。本文研究了太赫兹成像技术中时域光谱成像的时域和频域两种模式处理方法。以四种爆炸物为样品进行实验,时域模式下,主要讨论了振幅成像和位相成像;频域模式下,得到不同频率下的样品图像,与它们的指纹谱对比后判断出它们的位置,提供了一种太赫兹多光谱成像的识别方法。这些研究结果对提高太赫兹成像的分辨率和太赫兹图像识别有着重要的意义。为了实现太赫兹成像技术的早日实际应用,跨越分辨率低等障碍,需要不断对系统进行改进,对图像信息的分析和处理技术也有待进

一步实用化。

参 考 文 献

- 1 G. Zhao, M. T. Mors, T. Wenckebach *et al.*. Terahertz dielectric properties of polystyrene foam[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(6): 1476~1479
- 2 T. S. Hartwick, D. T. Hodges, D. H. Barker *et al.*. Far infrared imagery[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(8): 1919~1921
- 3 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 70
张存林,张岩,赵国忠等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 70
- 4 Tamath Rainsford, Samuel P. Mickan, Derek Abbott. T-ray sensing applications: review of global developments[C]. *SPIE*, 2005, **5649**: 826~838
- 5 David Crawley, Christopher Longbottom, Vincent P *et al.*. Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue[J]. *J. Biomedical Opt.*, 2003, **8**(2): 303~307
- 6 Pan Ciling. An overview of THz research activities in Taiwan [C]. *SPIE*, 2005, **5727**: 74~81
- 7 Matthew B. Campbell, Edwin J. Heilweil. Noninvasive detection of weapons of mass destruction using terahertz radiation[C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 38~43
- 8 Hua Zhong, Nick Karpowicz, Jason Partridge *et al.*. Terahertz wave imaging for landmine detection[C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 33~44
- 9 Michael J. Fitch, Dunja Schauki, Craig A. Kelly *et al.*. THz imaging and spectroscopy for landmine detection [C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 45~54
- 10 Wang Shaohong, Xu Jingzhou, Wang Li *et al.*. Applications and prospects of terahertz technology [J]. *Physics*, 2001, **30**(10): 612~615
王少宏,许景周,汪力等. THz技术的应用与展望[J]. 物理, 2001, **30**(10): 612~615